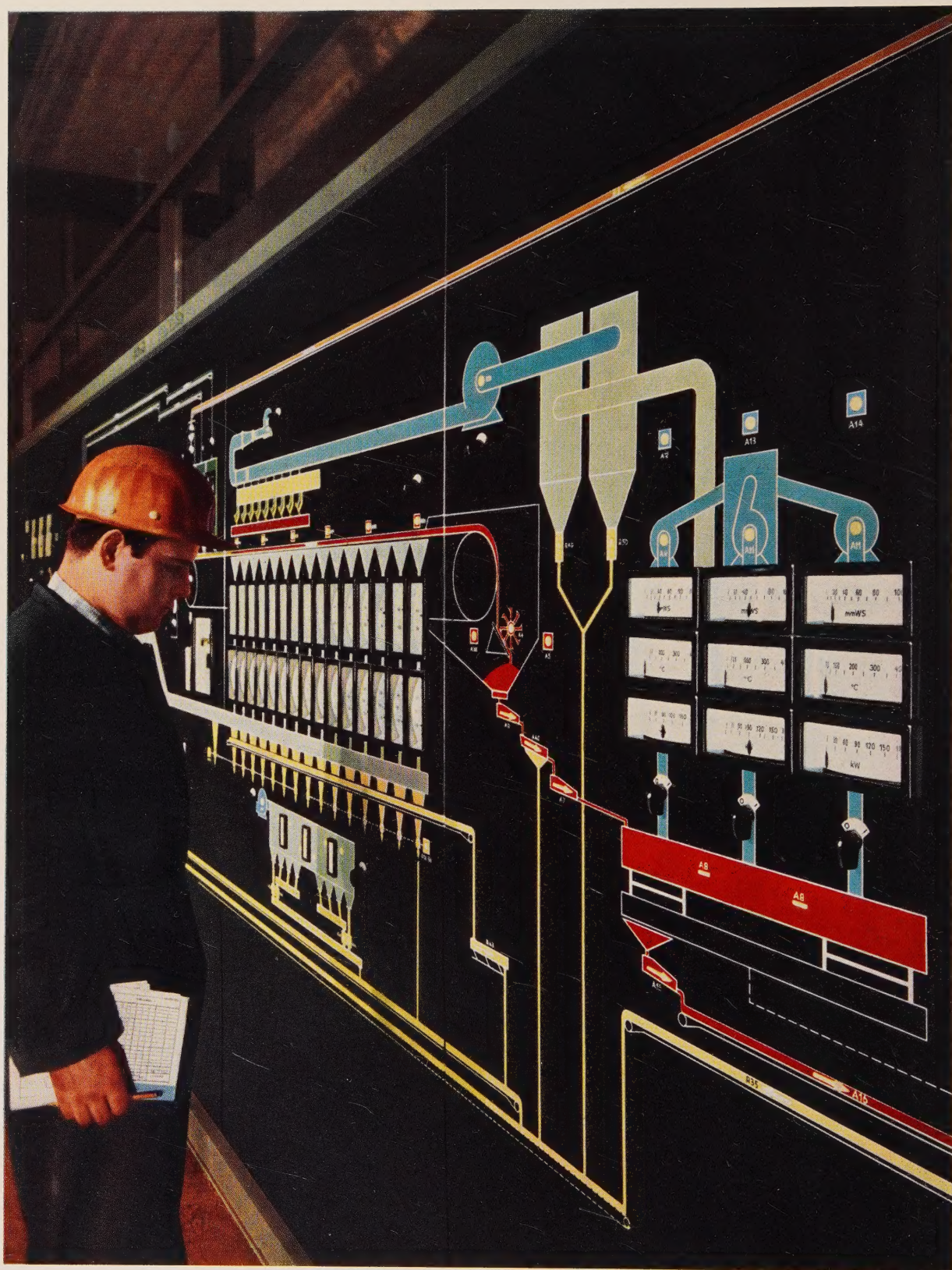


## INHALT

MERZ	Der Fortschritt in der regelungstechnischen Ausrüstung von Anlagen der Großchemie .....	295
FUNK	Fortschritte der Starkstromtechnik bei der Anwendung in Chemie-Betrieben .....	303
KLEINVOGEL/POKORNY	Silizium-Gleichrichtergeräte großer Leistung in Einheitsbauweise .....	310
MÜLLER	Silizium-Gleichrichter im Elektrolysebetrieb .....	317
FRIEBEL/KALTENECKER/SIEMS	Kleinwartentechnik in Wärmewarten von Kraftwerken .....	323
BAHR/HÜBNER/WALTENBERGER	Entwicklungsstand großer Drehstromantriebe für die chemische Industrie .....	333
WESSELAK	Der Antrieb von Kolbenverdichtern mit stromrichter gespeisten Gleichstrommotoren .....	344
REINHARDT	Explosionssgeschützte Drehstrom-Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« .....	350
DÖLL/LUTZ/STANZEL	Druckfeste Motoren für Nieder- und Hochspannung .....	353
BLÄSS	Die digitale Tankstandmessung als Grundlage zur Ermittlung des wahren Tankinhalts .....	358
HORN	Wirkungsweise und Schaltungstechnik elektrischer Dehnungsmeßstreifen-Manometer .....	363
KÄUFLEIN	Flüssigkeitszähler mit selbsttätiger Umwertung zur temperaturunabhängigen Mengenzählung .....	368
LIEBLER	Meß- und Regelanlagen für die Gewinnung von Papierrohstoffen aus einjährigen Pflanzen .....	370
NIEVELSTEIN	Die Regelung von Band-Sinteranlagen mit TELEPERM-Reglern .....	373
ALLERS/HAMMER	Regelung einer Walzenringmühle für Rohmehl mit Geräten des TELEPERM-Systems .....	378
JANISCH/WEBER	Über elektrische Ausrüstungen von Düngemittelfabriken .....	381
SCHWARZ/SCHLITT/GÖTZ	Verfahrensgerechte Spannungssteuerung von Elektrofiltern .....	387
ENGELS	ELMO-Kompressoren für höhere Systemdrücke .....	392
HECHT/MUGELE	Einfluß des Druckverhältnisses auf die Ausführung von ELMO-Vakuumpumpen .....	395
FRÖHLICH	Anwendung der elektrischen Glimmentladung zur Vorbehandlung von Polyäthylen .....	397
SPERLING	Elektrischer Korrosionsschutz .....	400
NAUMANN	Die Gasentnahme für industrielle Analysegeräte .....	407
GRIMM	Gasanalysegeräte auf physikalischer Grundlage .....	415
BOCK/KRÜGER	Überwachung kontinuierlicher Prozesse durch zyklische Grenzwertkontrolle .....	421
KALTENECKER	Prozeßsteuerungen .....	426
KÜRNER	Ein Digital-Auswertegerät für Gas-Chromatographen .....	430
RINN	Impulshöhenanalyse und $\gamma$ -Spektroskopie .....	434
MOOK	Der KRISTALLOFLEX 4, ein hochkonstanter Röntgenapparat für röntgenographische Analyseverfahren .....	440
LUCAS/NÜTZEL	Ein verbessertes Verfahren zur röntgenographischen Bestimmung des Restaustenits in gehärteten Stählen .....	445
BRODKORB	Bestimmung von Kupfer in Schwefelkies durch Röntgenfluoreszenzanalyse .....	451
SAUER	Ofentransformatoren für Karbidöfen hoher Leistung .....	453
KRÜTZFELDT	Erfahrungen mit Dehnungsmeßstreifen-Manometern an großen, fünfstufigen Kolbenkompressoren .....	454
FISCHER/KÄPPNER	Synchron-Kompressorantriebe mit extrem niedrigen Rückwirkungen auf das Netz .....	456
HOPPMANN	Dehnungsmeßstreifen-Manometer zur Fernmessung des Druckes in einer Pipeline .....	458





Betriebsschaubild für die Überwachung und Regelung einer Band-Sinteranlage  
(Dillinger Hüttenwerke)



## Der Fortschritt in der regelungstechnischen Ausrüstung von Anlagen der Großchemie

VON LUDWIG MERZ\*

Der Fortschritt auf dem Gebiet der Meß- und Regelgeräte für die Ausrüstung chemischer Großanlagen vollzieht sich vornehmlich unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit und der Betriebssicherheit.

Für die Benutzer der Meß- und Regelgeräte war es zwingend notwendig, die Wirtschaftlichkeit der Prozesse und die Qualität der Erzeugnisse stetig zu verbessern. Für alle Großprozesse bedeutet dies nichts anderes als eine weiter getriebene Automatisierung der Anlagen: Wenn es im allgemeinen gelungen ist, die Produktionskosten trotz gesteigerter Preise für Ausgangsstoffe und menschliche Arbeit in den gegebenen Grenzen zu halten, so wurde dies durch eine immer weiter vorwärts getriebene Automatisierung bewirkt, die sich auf die jeweils leistungsfähigsten Regelgeräte abstützte.

Der zweite Grund für die schnelle Weiterentwicklung regelungstechnischer Ausrüstungen ist die Notwendigkeit, umfangreichere und kompliziertere chemische Verfahren sicher zu beherrschen. Man muß die Betriebsvariablen der Prozesse ununterbrochen auf den günstigsten Werten halten; deshalb müssen alle in den Veredelungsprozeß eingreifenden physikalischen Größen selbsttätig geregelt werden. Die Investitionen für die regelungstechnische Ausrüstung von Chemiebetrieben betragen deshalb schon bei einfachen Anlagen einige hunderttausend Mark; sie erreichen bei Großanlagen bis zu 15% der insgesamt erforderlichen Aufwendungen.

Ein dritter Impuls für die Fortschritte auf diesem Gebiet ergibt sich als unmittelbare Folge der beiden erstgenannten Gründe: Die Gerätehersteller müssen – wie kaum auf einem anderen Gebiet – außerordentliche Anstrengungen machen, um mit den gesteigerten Anforderungen Schritt zu halten und im Wettbewerb jederzeit die technisch beste Ausrüstung bieten zu können.

Die Voraussetzungen für eine regelungstechnische Ausrüstung sind sehr verschieden, je nachdem, ob es sich um kontinuierliche oder um diskontinuierliche Prozesse handelt. Anlagen für kontinuierliche Prozesse lassen sich leichter instrumentieren und regeln als solche für sogenannte »Chargenprozesse«.

Von Natur aus kontinuierlich sind z. B. die Prozesse der Energieerzeugung. Deshalb hat die Regelungstechnik in das Kesselhaus sehr früh Eingang finden können. In der Chemie – wie übrigens auch in der Automobilindustrie – sind die Prozesse ursprünglich alle diskontinuierlich, in Chargen, betrieben worden. Die Chemie läßt aber seit etwa 1912 ihre Großprozesse kontinuierlich ablaufen. Dieser wichtige und entscheidende Schritt zur Automatisierung ist also im Chemiebetrieb bereits mehrere Jahrzehnte früher getan worden als in der Automobilindustrie. Wenn man also über die geschichtliche Entwicklung der »Automation« spricht, muß man neben der Erdölindustrie und dem Kesselhaus besonders den Chemiebetrieb und seine Umstellung auf einen kontinuierlichen Materialfluß erwähnen.

### Zur Automatisierung kontinuierlicher Prozesse

Die Automatisierung kontinuierlicher Prozesse mit Hilfe der Meß- und Regelungstechnik ist in der Chemie zu großer Vollkommenheit entwickelt worden.

Das Material wird in einem gleichbleibend geregelten Fluß den verschiedenen Reaktionsgefäßen zugeführt. Kennzeichnend für einen kontinuierlichen Prozeß ist deshalb das räumliche Fließschema, das man in vielen Regelanlagen solcher Anlagen als grafisches Fließschaltbild (graphic panel) darstellt. Wenn der Umfang der Anlage es zuläßt, kann man die Meß- und Bedienungsgeräte unmittelbar in das Fließschaltbild einbauen (Bild 1). In sehr großen Anlagen könnte die Vielzahl der erforderlichen Meßinstrumente das Bild verwirren und es unübersicht-

\* Prof. L. Merz ist Mitglied des DECHEMA-Vorstandes.



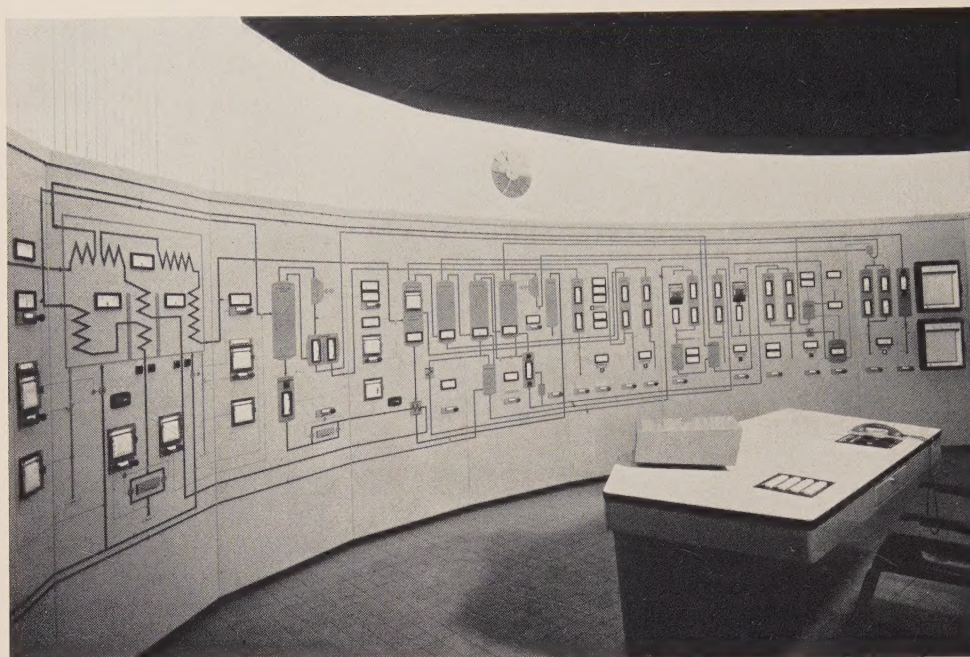


Bild 1 Ausschnitt aus der  
 Warte einer chemischen  
 Produktionsanlage,  
 Instrumente in das  
 Fließbild eingebaut

lich machen. Dann ordnet man das Fließbild, das das Verfahren anschaulich macht und auf dem die gemessenen und die geregelten Betriebsvariablen durch Signallampen gekennzeichnet sein können, in einem Fries oberhalb der Instrumententafeln an. In Raffinerieanlagen der Erdölindustrie und in der chemischen Industrie sind heute Schalttafeln nicht ungewöhnlich, die je laufenden Meter bis zu neun Kleinschreiber und dazugehörige Leitgeräte für Regler enthalten (Bild 2).

Die regelungstechnische Beherrschung des kontinuierlichen Prozesses läuft darauf hinaus, den Materialfluß zwischen den einzelnen Reaktionsgefäßen zu regeln und die Prozeßvariablen, die auf das Material einwirken, auf bestimmten Festwerten zu halten. Diese Prozeßvariablen sind Durchflüsse, Behälterstände, Temperaturen, Drücke, Gaszusammensetzungen, pH-Werte usw.

Aufgrund seiner Erfahrung, seiner Kenntnisse und seiner Einsicht in den Prozeß legt der Prozeßfahrer die Sollwerte für die Regler und ihre Zeitprogramme fest; er verbessert sie schrittweise derart, daß die Güte des Produktes und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses dem günstigsten Werte zustreben.

Die Arten der Verflechtung, mit denen die einzelnen Regelkreise einer Anlage zueinander in Beziehung treten, sind überaus vielfältig. Besonders erwähnen muß man die neuerstellten Anlagen der Petrochemie. Die Rohstoffbasis der organischen Chemie war in unserem Land fast hundert Jahre lang der Steinkohlenteer, der bei der Herstellung von Koks als Nebenprodukt anfällt. Die zur Verfügung stehenden Mengen wurden in den letzten Jahren mehr und mehr unzureichend für den stark anwachsenden Bedarf der Kunststoffchemie. Die Chemie

mußte sich deshalb nach anderen, in ausreichender Menge beschaffbaren Rohstoffen umsehen. Das steigende Angebot von Rohöl aus dem mittleren Osten ergab günstige Bedingungen. Der Aufbau von Chemiebetrieben auf Erdölbasis führte einerseits zu einer engen Zusammenarbeit zwischen Erdölraffinerien und Chemiebetrieben, andererseits auch zur Entwicklung neuer petrochemischer Großprozesse.

Die Notwendigkeit, Betriebe verschiedener Art zusammenzuschließen und zentral zu führen, die wachsende Größe und die zunehmende Kompliziertheit der Raffinerien und der damit verbundenen chemischen Betriebe verstärkten die Regler-Anwendung und vergrößerten den Raumbedarf für die Regelwarten. Zugleich wurde es für das Betriebspersonal schwieriger, die von den verschiedenen Meßgeräten gelieferten Informationen aufzunehmen und sie für die richtige Einstellung der Reglersollwerte zu verwerten. Die Bemühungen, in der Meßwarte eine Übersicht über das Ganze sicherzustellen, haben sich in mehreren Richtungen ausgewirkt. Bemerkenswerte Entwicklungen sind: die räumliche Verkleinerung der Meß- und Bedienungsgeräte, die Verminderung der dem Betriebspersonal gebotenen Daten auf die für die Führung des Betriebes notwendige Anzahl und die Aufbereitung der aus dem Betrieb zufließenden Daten durch automatische Verarbeitung der Informationen.

Zu den wichtigsten Rohstoffen der organischen Chemie gehören Azetylen und Äthylen. In der Hochtemperatur-Pyrolyseanlage werden Leichtbenzine (Überschußprodukte der Raffinerien) bei sehr hohen Temperaturen (etwa 2500°C) in Azetylen und Äthylen gespalten. Durch Wahl der Temperatur ist es möglich, das Azety-



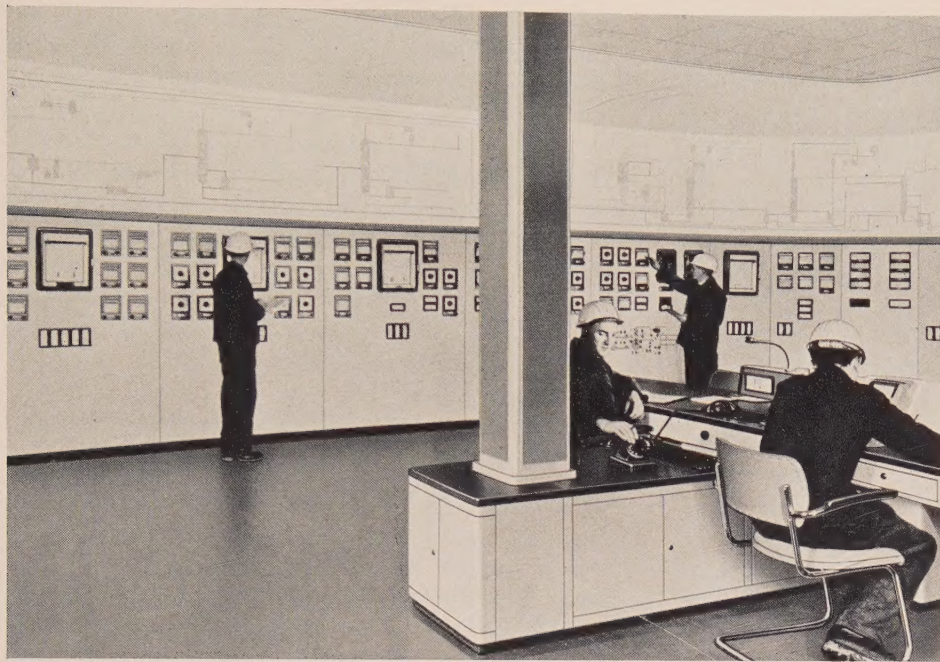


Bild 2 Warte einer chemischen Produktionsanlage. Instrumente in Gruppen angeordnet, Fließbild als Fries ausgeführt

len-Äthylen-Verhältnis in weiten Grenzen zu verändern. Bild 3 macht die regelungstechnische Ausrüstung eines petrochemischen Großprozesses anschaulich.

Als ein Beispiel für den Umfang der regelungstechnischen Ausrüstung seien noch die Zahlen wiedergegeben, die W. GEISS für eine Anlage zur Erzeugung von Butadien aus Normalbutan (n-Butan) angegeben hat. Diese Anlage enthält etwa 175 Einzelapparate (Reaktoren, Erhitzer, Kühler, Kolonnen, Vorlagen) und etwa 100 Arbeitsmaschinen, wie Pumpen und Kompressoren. Zum Einstellen physikalischer Zustandsgrößen sind in

dieser Anlage 41 Regelungen vorgesehen. Zur Anpassung der hintereinandergeschalteten Apparate und Maschinen an den kontinuierlichen Stofffluß sind 67 Regler eingebaut. Die Anlage enthält mehr als 100 Regelkreise.

Wenn der Raffineriebetrieb und der petrochemische Betrieb bei zusammengefaßten Anlagen zentral überwacht werden müssen, ergeben sich neue Probleme: Überwindung der Entfernungen zwischen den ausgedehnten, von den anderen getrennt liegenden Anlageteilen, Gestaltung der Meßhäuser, Aufbereitung der Daten und selbsttätige Führung der zusammengefaßten Betriebe.

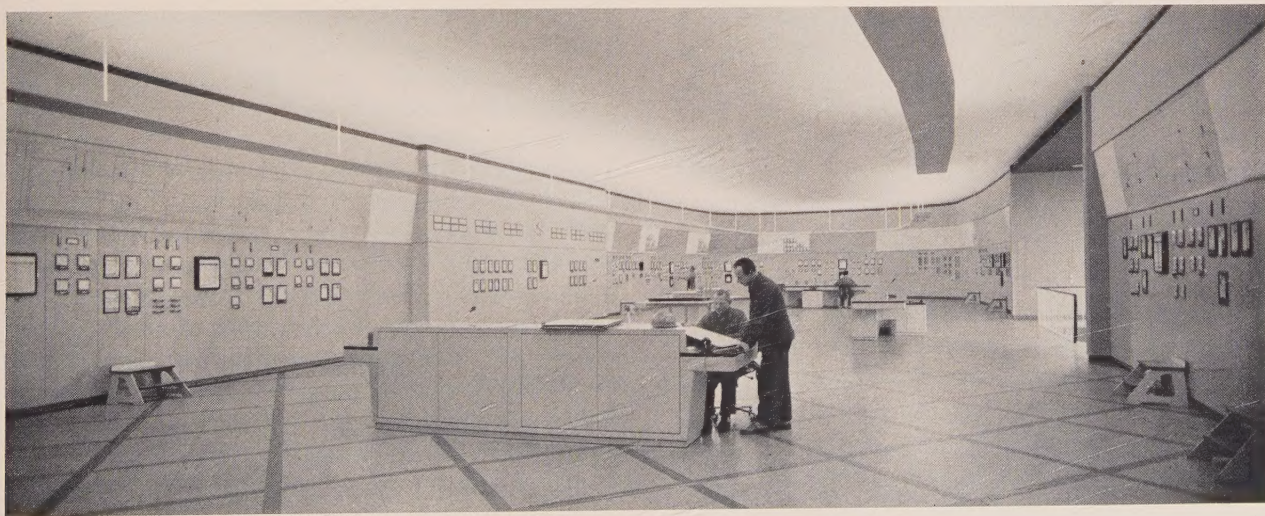


Bild 3 Meßhaus einer Hochtemperatur-Pyrolyseanlage (Foto: Farbwerke Hoechst)



## Neue Wege zur Instrumentierung von Großanlagen

Es ist verständlich, daß die Benutzer der Meß- und Regelgeräte immer dringender wünschten, daß die Geräte für die verschiedensten Anwendungsfälle möglichst gleichartig und untereinander auswechselbar sein sollten. Nur auf diese Weise ist es möglich, bei der stark wachsenden Anzahl der Regelkreise das Lager an Ersatzgeräten und Einzelteilen klein zu halten und für die Ausrüstung der verschiedenen Prozesse beweglich zu bleiben. Der Wunsch der Benutzer ist im Einklang mit dem Streben der Hersteller, die Typenanzahl zu beschränken und die zur Verfügung stehende Entwicklungskapazität auf höchste Leistungen zu konzentrieren.

Dies hat zur Entwicklung sogenannter Einheitssysteme geführt. Während es vor Jahren noch durchaus üblich war, für bestimmte Zwecke und für bestimmte Meßgrößen besondere Regler zu entwerfen, so daß also das Einzelgerät im Vordergrund der Entwicklungstätigkeit stand, sind in den letzten Jahren für die regelungstechnische Ausrüstung verschiedenartiger Prozesse wohl- abgestimmte Einheitssysteme entstanden.

Der Fortschritt im Reglerbau beruht also nicht mehr auf der Herstellung von Geräten für Sonderzwecke, sondern darauf, daß nach einheitlichen Gesichtspunkten eine Gerätekette geplant wird, wobei die Einzelgeräte bezüglich ihrer regelungstechnischen Eigenschaften besonders sorgfältig aufeinander abgestimmt werden müssen.

Über das TELEPERM\*-TELEPNEU\*-System ist an anderer Stelle bereits berichtet worden. Hier sei deshalb nur betont, daß der Entwicklung eines Einheitssystems sorgfältige Studien vorausgehen müssen hinsichtlich der zweckmäßigen Wahl der Hilfsenergie und in bezug auf die richtige Abstimmung der meß- und regelungstechnischen Mittel bei jedem Einzelgerät, besonders mit Rücksicht auf das Zusammenwirken der Geräte und mit Rücksicht auf die verschiedenen in Betracht kommenden Regelstrecken. Der erforderliche Aufwand an Arbeit in den Laboratorien und in den Konstruktionsbüros ist deshalb erheblich; es muß auch dafür gesorgt werden, daß der Entwurf eines Einheitssystems genügend weit in die Zukunft greift, damit es viele Jahre im Konkurrenzkampf bestehen kann.

Bild 4 zeigt die Blockschaltung eines Regelkreises, aus dem die wichtigsten Teile der Gerätekette eines Einheitssystems ersichtlich sind. Es ist auch angedeutet, welche physiologischen Analogien den einzelnen Geräten des Einheitssystems zugeordnet sind. Charakteristisch für die Einheitssysteme ist das Auftreten von Meßumformern in der Gerätekette.

Die Meßfühler sind die »künstlichen Sinnesorgane« des Regelkreises. Leider sind die Signale, die die meisten Meßfühler abgeben, uneinheitlich, schwach und wenig

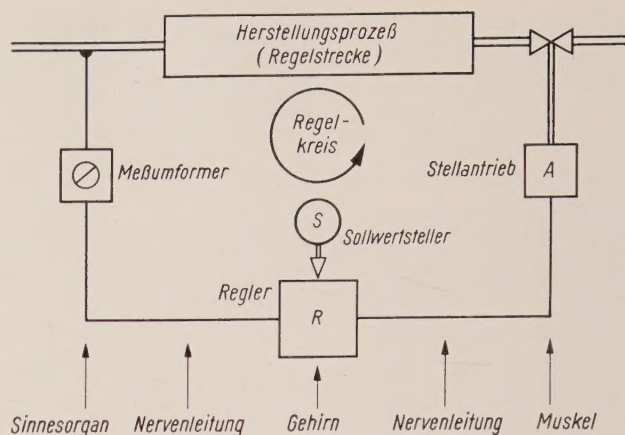


Bild 4 Regelkreis und physiologische Analogien

geeignet, Entfernungen zu überbrücken. Deshalb werden den Fühlern Meßumformer nachgeschaltet. Diese formen die ihnen dargebotene Meßenergie so um, daß man von den verschiedenartigen Meßgrößen einheitliche Signale gewinnt. Die Meßumformer haben auch Verstärkereigenschaften; ihre Ausgangsströme sind normiert, so daß alle hinter dem Meßumformer erscheinenden Geräte, wie Regler, Schreibgeräte, Schutzschaltungen usw., völlig gleich ausgeführt werden können.

Für das TELEPERM-TELEPNEU-System ist charakteristisch, daß als Hilfsenergie nicht die elektrische oder die pneumatische Energie ausschließlich verwendet werden kann, sondern daß der Übergang von elektrisch arbeitenden Geräten zu pneumatisch arbeitenden an jeder Stelle der Gerätekette möglich ist. Dies ist für Regelungen in der Chemie besonders vorteilhaft. Seit Jahrzehnten werden im Chemiebetrieb für die Aufgaben der Betriebskontrolle sowohl elektrische als auch pneumatische Geräte verwendet. Die Technik der elektrischen Geräte ist in den letzten Jahren durch Bauelemente der Elektronik sehr bereichert und erweitert worden. Als besonders vorteilhaft hat sich die Anwendung von Magnetikverstärkern und Transistoren erwiesen.

Die Frage, welche Art der Hilfsenergie die meisten Vorteile bietet, ist bis heute viel diskutiert worden. Die wichtigsten Gesichtspunkte sind: Explosionsschutz, Folgen des Ausfalls der Hilfsenergie, Einflüsse von Temperatur und Feuchte, Möglichkeit der Datenreduzierung, Durchführbarkeit von Rechenoperationen, Ausbildung von Schutz- und Auswahl-schaltungen, Überbrückung der Entfernung, Totzeit in der Weiterleitung der Signale, Reibung und Hysterese bei den verschiedenen Geräten und Fragen der Reparierbarkeit im eigenen Betrieb. Neuere Untersuchungen haben auch gezeigt, daß es nicht möglich ist, eine eindeutige Überlegenheit der einen oder der anderen Hilfsenergie festzustellen. Die Vorzüge der beiden Systeme sind aber ganz verschieden

\* Eingetragenes Warenzeichen



verteilt. So ist z. B. die Pneumatik unbedingt explosions-sicher; das wird ohne zusätzliche Mittel erreicht. Die Elektronik ist dagegen frei von Reibung und Hysterese, die Totzeiten bei der Weiterleitung der Signale sind äußerst klein. Da also die Vorzüge der beiden Hilfsenergien auf ganz verschiedenen Gebieten liegen, ist es durch das TELEPERM-TELEPNEU-System möglich geworden, einen entscheidenden Vorteil zu erzielen: Es können die Vorzüge beider Hilfsenergien nutzbar gemacht werden, wobei die Vorzüge der Elektronik meistens auf der Meßseite, die der Pneumatik auf der Stellseite liegen. Den Übergang von der elektrischen zur pneumatischen Hilfsenergie wird man innerhalb der Gerätekette an eine solche Stelle legen, die aus betrieblichen oder aus meßtechnischen Gründen am zweckmäßigsten erscheint.

Der Fortschritt in der Beherrschung der Herstellungsprozesse wird mehr und mehr durch eine verstärkte Anwendung selbsttätiger Analysegeräte erreicht werden, die von den Mitteln der Elektronik Gebrauch machen. Die Verbindung selbsttätiger Analysegeräte mit elektronischen Rechengeräten ermöglicht die automatische Führung von Prozessen. Von diesen Gesichtspunkten her gesehen, wird die Elektronik auf der Meßseite ein immer größer werdendes Feld für sich beanspruchen, wogegen auf der Stellseite die Vorzüge der Pneumatik unangetastet bleiben.

### Entwicklungslinien im Bau von Meß- und Regelgeräten

#### Raumsparende Meßgeräte

Es wurde bereits erwähnt, daß die Entwicklung der chemischen Betriebe zu immer größeren und komplizierteren Anlagen führt. In der regelungstechnischen Ausrüstung drückt sich dies nicht nur in einer stetig wachsenden Anzahl der Regelkreise aus, sondern auch im Raumbedarf für das Unterbringen der notwendigen Anzeige- und Überwachungsgeräte in der Warte. Die Schreibgeräte beanspruchen im allgemeinen den meisten Platz. Seit Jahren ist man deshalb bemüht, die Warten mit raumsparenden Schreibern auszurüsten und den Platzbedarf für die Bedienungselemente immer weiter zu verkleinern. Vor einigen Jahren gehörten Kompensationsschreiber mit einer Papierbreite von 250 mm und mit äußeren Abmessungen von 400 mm × 500 mm zu der normalen Ausrüstung von Raffinerieanlagen und Chemiebetrieben. Den Forderungen nach kleineren Grundflächen der schreibenden Meßgeräte entsprechend hat man für den KOMPENSOGRAF\* eine neue Bauform mit kleineren Frontrahmen-Abmessungen entwickelt. Neben den rein meßtechnischen Forderungen nach kleineren Meßbereichen und kurzen Laufzeiten wurden vielseitige Anwendbarkeit, wie z. B. die Austauschbarkeit der den Meßbereich bestimmenden Teile sowie eine möglichst einfache Bedientechnik berücksichtigt.

#### Die Kleinwarte

Eine bloße Verkleinerung der Elemente führt aber noch nicht zum gesteckten Ziel; auch die Schalttafeln und die Bedienungspulte müssen verkleinert und so gestaltet werden, daß sie bequem überblickbar sind und damit einen sicheren Betrieb gewährleisten. Eine radikale Lösung des Raumproblems der Steuer- und Regelwarten wird durch die neue Kleinwartentechnik angebahnt. Die Kleinwartentechnik stellt die Übersichtlichkeit wieder her, die infolge der starken räumlichen Ausdehnung bei den Steuerpulten herkömmlicher Bauart verlorenzugehen droht.

Die Steuereinrichtungen der Kleinwarten werden folgerichtig mit Schwachstrom betrieben; daraus ergeben sich die Vorteile:

1. Es ist möglich, das Konzept der Instrumentierung abzuändern und Umschaltungen vorzunehmen, ohne daß der Betrieb stillgelegt werden muß und ohne daß Personen gefährdet werden.
2. Gesteuert wird ausschließlich mit Drucktasten. Es hat sich gezeigt, daß sich eine Druckknopfsteuerung durch besondere Bedienungssicherheit und durch geringen Platzbedarf auszeichnet.
3. Die Kleinwartensteuerung nutzt alle Vorteile, die die Schwachstromtechnik bietet: Kleinrelais, Bausteine mit Transistoren, einfachere Leitungsverlegung und die Auswechselbarkeit der Elemente für Verriegelungen und für Auswahlhaltungen.
4. In der Schwachstromtechnik lassen sich auch Sicherheitsschaltungen nach dem Auswahlprinzip mit verhältnismäßig kleinem Aufwand verwirklichen. Mit solchen Schutzschaltungen, zuerst in der Reaktortechnik benutzt, kann man gefährliche Betriebe mit einer an Gewißheit grenzenden Wahrscheinlichkeit sicher überwachen. Diese Auswahlhaltungen, von denen die bekannteste die sogenannte Zwei-von-drei-Schaltung ist, werden auch in den Chemiebetrieben in allen den Fällen größere Bedeutung erlangen, in denen mit Rücksicht auf die Explosionssicherheit oder auf die Giftigkeit der verarbeiteten Substanzen besondere Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden müssen.
5. Besonders vorteilhaft sind die Schwachstromtechnik und die mit ihr verbundene Technik der Halbleiterelemente für den Aufbau von Logik-Schaltungen und für den Entwurf von Prozeß-Steuersystemen.

Bei dem derzeitigen Stand der Technik der Regelgeräte erscheint es zunächst nicht mehr unbedingt notwendig, jeden geregelten Meßwert von einem Schreiber für sich ununterbrochen aufzeichnen zu lassen; das Registrieren auf 50 oder 100 Schreibstreifen ist bei einem störungslos laufenden, vollgeregelten Betrieb kaum mehr erforderlich. Man registriert, damit der Prozeßfahrer bei anomalen Betriebszuständen nicht nur die Größe der Abweichung vom Normalwert, sondern auch den Ver-

\* Eingetragenes Warenzeichen



lauf der Meßgröße vor der Störung und die Tendenz der Regelabweichung erkennen kann. Darüber hinaus soll die ununterbrochene Aufzeichnung geregelter Größen eine nachträgliche Aufklärung der Störungsursache ermöglichen. Für das Anfahren der Anlagen von Hand und für das Umschalten eines gestörten Betriebes von selbsttätiger Regelung auf Handregelung genügen im allgemeinen die Anzeigen der Sollwerte und der Regelabweichungen. Die Aufgaben der Dokumentation und der Störungsaufklärung überträgt man heute in Großbetrieben zweckmäßigerweise einer Anlage für Meßwertverarbeitung.

Während bei der Energieerzeugung und in der Erdölindustrie diejenigen Anlagen überwiegen, bei denen die meß- und regelungstechnische Ausrüstung für viele Jahre unverändert festliegt, weil solche Anlagen stets das gleiche Erzeugnis unverändert liefern sollen, kommen in der chemischen Industrie häufig Anlagen vor, bei denen sich die Qualitätswerte ändern oder die Art der Erzeugnisse wechselt. Solche Anlagen, und damit auch ihre meß- und regelungstechnische Ausrüstung, müssen dann umgebaut werden. Diesem für Anlagen der Chemie spezifischen Bedürfnis kommt die neue Kleinwartentechnik sehr entgegen. Die Bedienungs- und Anzeigeelemente sind bei dieser Technik auf das Steuerpult konzentriert; das Steuerpult selbst ist nach dem Bausteinprinzip so aufgebaut, daß es jederzeit möglich ist, die Anordnung an den veränderten Bedarf anzupassen oder auch für einen anderen Prozeß umzurüsten.

Bei der Technik der Kleinwarten verzichtet man auf eine ununterbrochene Registrierung aller Prozeßvariablen. Es genügt, bei den geregelten Größen die wichtigsten Sollwerte und die dazugehörigen Regelabweichungen anzuzeigen. Gruppen anderer Größen können zusätzlich angewählt und auf die getrennt angeordneten Schreibgeräte verteilt werden. Anstelle der Aufzeichnung einer jeden Prozeßvariablen durch je einen Kleinschreiber tritt eine selbsttätig wirkende Einrichtung zur Datenreduzierung, die dem Prozeßfahrer nur diejenigen Größen unterbreitet, die in jeder Betriebsphase für die Beurteilung des Prozesses wichtig sind. Alle wichtigen Variablen werden durch diese selbsttätige Einrichtung dauernd daraufhin überwacht, daß die zulässigen Toleranzwerte eingehalten werden.

Mit dem Wegfall der zahlreichen Registriergeräte kann man für sehr viele Größen, z. B. für alle Temperatur- und alle Analysenwerte die Meßumformer einsparen; man benutzt dabei mit Vorteil elektro-pneumatische Regler (Bild 5).

#### Selbstüberwachung durch Auswahlssysteme

Nach dem Vorbild der Instrumentierung von Kernreaktoren geht man auch bei Anlagen in der Chemie dazu über, zur Erhöhung der Sicherheit wichtige Meßkanäle mehrfach durch Grenzwertmelder zu überwachen. Diese mehrfache Überwachung wird in Auswahlssystemen

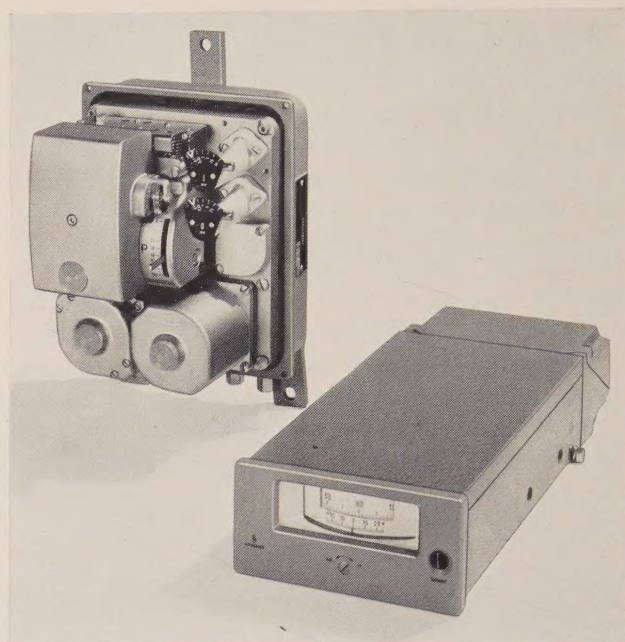


Bild 5 Elektro-pneumatischer Regler; Regeleinheit (Schutzhülle abgenommen) und Meßeinheit

zusammengefaßt. Der Grundgedanke ist dabei etwa folgender: Die Überwachungsgeräte sind nicht gegen Fehler gefeit. Infolge eines Fehlers in einem Gerät des Überwachungssystems kann vorgetäuscht werden, die Anlage sei nicht in Ordnung; dann wird sie u. U. grundlos abgeschaltet. Man nennt solche Fehler ungefährliche Fehler. Es können sich aber auch Fehler einschleichen, die die Meldung einer echten Gefahr verhindern. Solche Fehler nennt man gefährliche Fehler. Die Auswahlssysteme, z. B. ein überwachtes Zwei-von-drei-System, stellen sicher, daß gefährliche Zustände der Anlage erfaßt und gemeldet werden. Bei den meisten dieser Anlagen ist an das Auswahlssystem ein automatisches Abschaltssystem angeschlossen, das die Anlage im Gefahrfalle in einen ungefährlichen Zustand versetzt.

#### Zur Automatisierung diskontinuierlicher Prozesse in der Chemie

Es war nicht möglich, alle diskontinuierlichen chemischen Prozesse auf einen kontinuierlichen Betrieb umzustellen, weil ein kontinuierlicher Prozeß nur für einen großen Materialdurchsatz angemessen ist. Es gibt deshalb in der chemischen Industrie immer noch eine große Anzahl von Chargenprozessen. Während die regelungstechnische Beherrschung der kontinuierlichen Prozesse bereits sehr weit entwickelt ist, gehört die sichere Beherrschung der Chargenprozesse noch zu den Gegenwartsaufgaben der Automatisierung. Bei den diskontinuierlichen Prozessen läuft die Folge der Teiloperationen nicht räumlich hintereinander in mehreren Gefäßen ab, sondern zeitlich nacheinander in einem einzigen Gefäß, und zwar in einer



vorher festgesetzten Reihenfolge. Beim Chargenprozeß tritt also an die Stelle des räumlichen Fließschemas ein Zeitprogramm, und an die Stelle der konstanten Betriebsvariablen eine Programmsteuerung der physikalischen Zustandsgrößen, die im Prozeß auf das Material einwirken. In der Beherrschung der Chargenprozesse mit dem Ziel einer größtmöglichen Automatisierung sind in den letzten Jahren besonders auffällige Fortschritte gemacht worden.

Das Steuerprogramm

Bei den diskontinuierlichen chemischen Prozessen muß zunächst in einer Arbeitsvorschrift ausführlich dargelegt werden, in welcher Reihenfolge die einzelnen Stoffe in das Reaktionsgefäß gebracht werden müssen, wie die Energien zugeführt oder abgeführt werden und welche Temperaturen oder Drücke dabei eingeregelt werden müssen. Man muß festlegen, ob und wann zur Mischung der Komponenten gerührt werden soll, bei welchen Ereignissen bestimmte Vorgänge unterbrochen oder modifiziert werden müssen (z. B. bei Schaumbildung, bei zu schneller Drucksteigerung), welchen zeitlichen Ablauf die Prozeßvariablen in jedem Takt einhalten sollen und unter welchen Bedingungen der Gesamtprozeß beendet ist und das Reaktionsgefäß wieder entleert werden kann. Eine automatisierte diskontinuierliche Anlage enthält also die gleiche Meßtechnik und die gleichen Regelkreise wie eine kontinuierliche Anlage. Diesen Regelkreisen ist aber eine Steuerung übergeordnet, die das Arbeitsprogramm, also das Rezept einschließlich des Zeitprogrammes schaltungstechnisch verwirklicht. Für das Umsetzen der Arbeitsvorschrift in die steuerungstechnische Wirklichkeit bedient man sich der Relaischnik oder auch der Technik der Logikelemente. Mit einem wohlabgestimmten System solcher Logikelemente, für die das SIMATIC\*-System beispielhaft ist, ist es möglich, diskontinuierliche Herstellungsprozesse zu automatisieren, ohne die kostspielige Umstellung auf einen kontinuierlichen Materialfluß vornehmen zu müssen; eine solche Umstellung könnte auch nur dann gewagt werden, wenn die verfahrenstechnische Durchführung des Prozesses auf lange Zeit festliegt und wenn der Materialdurchsatz genügend groß ist.

Besonders vorteilhaft für die selbsttätige Steuerung diskontinuierlicher Prozesse ist es, die charakteristischen Steuerungsaufgaben solchen Baueinheiten zu übertragen, die für den Zweck der Taktsteuerung besonders zugeschnitten sind; dadurch ergeben sich erhebliche Einsparungen an Verdrahtung, an Bauelementen und an Volumen gegenüber den reinen Logiksystemen.

Bild 6 zeigt die Blockschaltung eines Prozeß-Steuersystems. Das Steuergerät besteht im wesentlichen aus drei mit Transistoren bestückten Baueinheiten: Der Taktstufe, der Kommando- und Rückmeldeeinheit

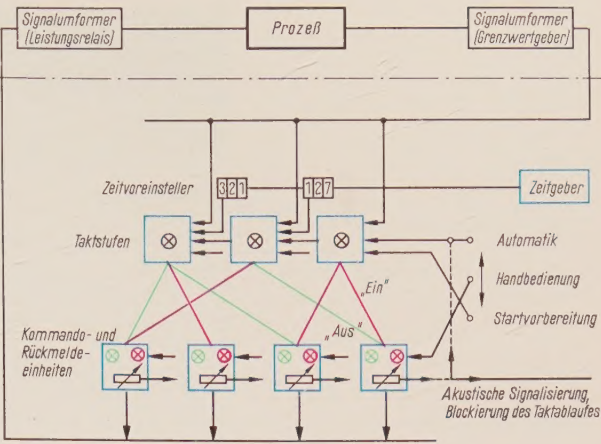


Bild 6 Blockschaltung eines Prozeß-Steuersystems

(Steuereinheit) und dem Zeitgeber. Der Anreiz der Taktstufen kann durch Meßwerte aus dem Prozeß, aus Zeitbedingungen heraus und durch Eingriff von Hand erfolgen; außerdem ist es möglich, auch Nebenbedingungen, z. B. Verriegelungen, einzuführen.

Die Kommando- und Rückmeldeeinheiten stellen die Verbindung zwischen Taktstufe und Prozeß her. Die Prozeßzeiten werden von einer elektronischen Uhr nachgebildet; gewünschte Zeiten zwischen einer Sekunde und mehreren Tagen können an Zeiteinstellern gewählt werden.

Für alle Steuersysteme sind Grenzwertgeber unentbehrlich. Sie signalisieren das Überschreiten oder das Unterschreiten bestimmter Werte der Meßgrößen. Es stehen

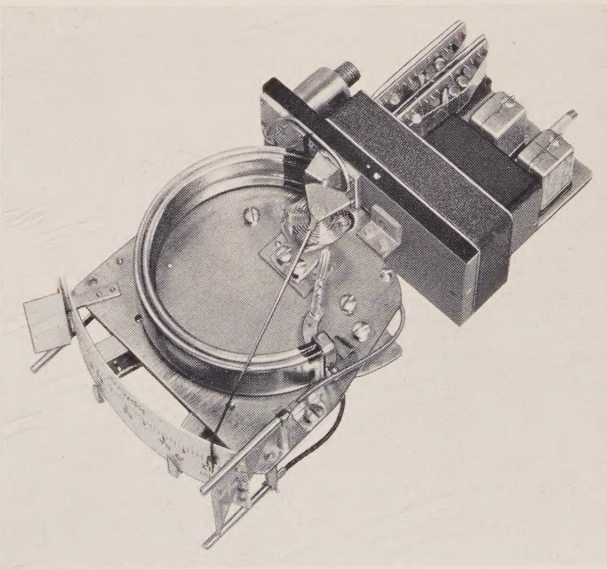


Bild 7 Meßwerk eines TELEPNEU-Grenzwertmelders

\* Eingetragenes Warenzeichen



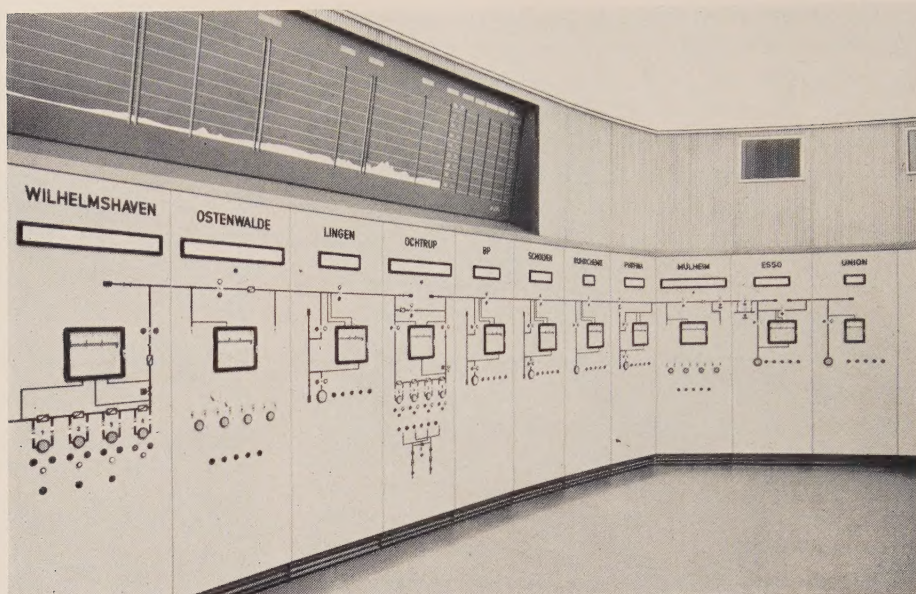


Bild 8 Leitstelle  
der fernüberwachten  
und ferngesteuerten  
Erdöl-Transportleitung  
Wilhelmshaven-Köln

für jede Art der Meßgrößen Grenzwertmelder zur Verfügung. Bild 7 zeigt als Beispiel das Meßwerk eines TELEPNEU-Grenzwertmelders.

Allen Geräten der Regelungs- und Steuerungstechnik haben die Elektronik und die Halbleitertechnik in den letzten Jahren ihr besonderes Gepräge gegeben. Die Technik dieser Elemente kommt einer Entwicklungslinie entgegen, die sich mehr und mehr in der Instrumentierung durchzusetzen beginnt. Es ist dies die Forderung nach kontaktlosen Meß-, Regel- und Steuerschaltungen.

#### Überwachung von Prozessen durch ein Signalsystem

Hierfür steht ein kontaktloses Prozeßsignalsystem zur Verfügung. Das Überschreiten von Grenzwerten wird von diesem System optisch und akustisch signalisiert. Das Prozeßsignalsystem arbeitet ausnahmslos mit Transistoren. Angezeigt wird das Erscheinen eines Grenzwertes; der Prozeßfahrer kann den Grenzwert quittieren.

Oft hat das Überschreiten eines Grenzwertes bei Störungen zur Folge, daß sich auch andere Meßwerte von ihrem Normalwert in unzulässiger Weise entfernen. Für die Aufklärung der Störung ist es dann wichtig, zu wissen, welcher Grenzwert zuerst angesprochen hat. Dies wird durch das Signalsystem selbsttätig festgestellt.

Bedeutung der Kleinwartentechnik und der Datenreduzierung für die Automatisierung diskontinuierlicher Prozesse

Für die Automatisierung diskontinuierlicher Prozesse in der Chemie stehen heute alle notwendigen Mittel zur

Verfügung. Besonders wichtig ist, daß die Kleinwartentechnik neue und besonders günstige Voraussetzungen für die Instrumentierung von Chargenprozessen bietet. Gerade bei diskontinuierlichen Prozessen in der Chemie muß die Instrumentierung besonders flexibel sein, es muß leicht möglich sein, eine einmal ausgeführte Instrumentierung neuen Forderungen anzupassen.

Der Prozeßfahrer wird weiterhin entlastet durch die Einrichtungen für eine Datenreduzierung. Diese Einrichtungen sollen die Aufmerksamkeit des Betriebspersonals auf die Meßgrößen hinlenken, die für den jeweiligen Betriebszustand wichtig sind; sie zeigen entweder Abweichungen vom Normalzustand an oder sie geben Hinweise darauf, wie sich die Prozeßführung verbessern läßt.

In diesem Zusammenhang seien auch die Anlagen für Fernmessung und Fernsteuerung erwähnt, die durch die großen Verteilungsnetze für Erdöl und Gas für die chemische Industrie an Bedeutung gewonnen haben. Da heute eine Fernmessung für derartige Betriebe im allgemeinen auch Aufgaben der Fernsignalisierung und der Fernsteuerung übernehmen muß, setzt sich das Puls-Code-Verfahren immer mehr durch; ein besonderes Kennzeichen dieser Anlagen ist es, daß Meßwerte, Meldungen und Befehle äußerst sicher übertragen werden. Bild 8 zeigt die Leitstelle einer fernüberwachten und ferngesteuerten Erdöl-Transportleitung.

#### Zur automatischen Führung von Prozessen durch Rechenggeräte

In den letzten Jahren ist die Anwendung von Rechenggeräten zur automatischen Führung von Prozessen sehr



eingehend diskutiert worden. Es kann hier auf dieses große und wichtige Gebiet nicht näher eingegangen werden, jedoch sei darauf hingewiesen, daß es verfehlt wäre, wenn man die Aufgabe der automatischen Führung von Prozessen allein vom Standpunkt des Rechners ansehen wollte. Aufgabe der Prozeßführung ist es ja, die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu optimieren, und Wirtschaftlichkeit bedeutet in der Chemie so viel wie Verbesserung der Ausbeute und der Qualität des Produktes. Qualitätsforderungen laufen aber im allgemeinen auf Forderungen nach Reinheit hinaus. Es genügt deshalb nicht, den Rechner mit Informationen nur über die Betriebsvariablen zu versorgen. Zur Ermittlung des Optimums gehören auch Informationen über die Zusammensetzung der Hilfsstoffe und der Zwischenprodukte, die durch kontinuierliche Analysegeräte vermittelt werden. Der Fortschritt in der selbsttätigen Führung von Prozessen ist in der Chemie deshalb sehr an eine Weiterentwicklung und Vervollkommenung der selbsttätigen Analysegeräte gebunden. Vor allem sind es die Verfahren der Gas-Chromatographie und der Ultrarot-Analyse, die sich durch eine hervorragende Selektivität gegenüber den Begleitkomponenten auszeichnen und die deshalb besonders wichtig für die Zusammenarbeit mit automatischen Rechengernäten sind. Weil diese Betriebsmeßgeräte zur selbsttätigen Analyse lange Zeit ohne Wartung arbeiten sollen, müssen sie sehr betriebssicher und von Nullpunktdrift frei sein. In den letzten Jahren richtete sich das Interesse der Regelungstechniker hauptsächlich auf die Entwicklung von Regelungssystemen. Dieses Interesse wird sich in den nächsten Jahren mehr und mehr dem Prozeß zuwenden. Der Schlüssel für eine optimale Führung der Prozesse ist dabei das Analysegerät.

#### Schrifttum

- [1] Geiss, W.: Automatisierung in petrochemischen Anlagen. Regelungstechnik 8 (1960) 185 bis 190
- [2] Die HTP-Anlage. Die Farbenpost 7 (1960) 8
- [3] Matuschka, H. und Sartorius, H.: Das kombinierte TELEPERM-TELEPNEU-Regelsystem. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 291 bis 296
- [4] James, L. S.: Instrumentation and Control in the Oil and Gas Industries. British Power Engineering 2 (1961) 55 bis 59
- [5] Dobson, J. G.: Optimale Regelung von Destillationskolonnen durch Vorausregelung mit Hilfe eines Elektronenrechners. Regelungstechnik 8 (1960) 393 bis 399
- [6] Friebe, M., Kaltenecker, H. und Siems, H.: Kleinwertentechnik in Wärmewerten von Kraftwerken. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 323 bis 333
- [7] Kaltenecker, H.: Prozeßsteuerungen. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 426 bis 430
- [8] Grimm, H.: Gasanalysegeräte auf physikalischer Grundlage. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 415 bis 420
- [9] Naumann, A.: Die Gasentnahme für industrielle Analysegeräte. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 407 bis 415
- [10] Hengstenberg, J. und Ankel, Th.: Meßwertverarbeitung in der chemischen Technik. Regelungstechnik 8 (1960) 330 bis 335 und 399 bis 405
- [11] Ankel, Th.: Anwendung von Rechenmaschinen in der chemischen Industrie. Regelungstechnik 8 (1960) 227 bis 233 und 297 bis 301
- [12] Kosbahn, Th.: Die Steuerung in der Verfahrenstechnik. Regelungstechnik 8 (1960) 79 bis 84
- [13] Eifert, G.: Regeln und Steuern in einer Gasspalanlage. Gaswärme 9 (1960) 206 bis 209
- [14] Oetker, R.: Folgeregler als Stellsystem übergeordneter Regelkreise. Regelungstechnik 9 (1960) 13 bis 17
- [15] Einsatz eines Digitalrechners bei der BASF. Regelungstechnik 8 (1960) 452
- [16] Pavlik, E. und Machei, B.: Ein kombiniertes Regelsystem für die Verfahrensindustrie. R. Oldenbourg, München 1960
- [17] Matuschka, H.: Neue elektrische Regelmethoden für die Wärme- und Verfahrenstechnik. ETZ-A 78 (1957) 801 bis 803
- [18] Sartorius, H. und Kluge, K.: Das TELEPNEU-System. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 556 bis 567
- [19] Schlick, K.: Ein neuer elektrischer Regler. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 482 bis 486
- [20] Fuchs, K.: Ein neues Meß- und Regelsystem für die wärmetechnische Verfahrensindustrie. Gaswärme 9 (1960) 76 bis 85
- [21] Schlick, K.: TELEPERM-Zeitglied und elektromechanischer TELEPERM-Rechner. Regelungstechnik 8 (1960) 270 bis 273
- [22] Fuchs, K. und Schlick, K.: Ein elektronischer Universalregler im TELEPERM-System. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 555 bis 561
- [23] Früh, K.F.: Der elektropneumatische Umsetzer des TELEPERM-TELEPNEU-Regelsystems. Regelungstechnik 6 (1958) 334 bis 336
- [24] Kübler, A. und Sartorius, H.: 3 Jahre TELEPERM-TELEPNEU-System. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 551 bis 555
- [25] Kronmüller, H.: Elektrische Meßumformer nach dem Kraftvergleichs-Verfahren. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 486 bis 491
- [26] Kronmüller, H.: TELEPERM-Abgriff. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 264 bis 266
- [27] Kronmüller, H.: TELEPERM-Meßumformer. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 561 bis 564

## Fortschritte der Starkstromtechnik bei der Anwendung in Chemie-Betrieben

VON GUSTAV FUNK

Seit der vorigen ACHEMA im Jahr 1958 wurden auch bei der Starkstromausrüstung chemischer Betriebe beachtliche Fortschritte erzielt. Dazu gehören alle Starkstromanlagen der Drehstromerzeugung und -verteilung, der Gleichstromversorgung für die Elektrolysen und alle elektromotorischen Antriebe einschließlich Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungseinrichtungen.

Technische Fortschritte lassen sich auf industriellem Gebiet leicht verwirklichen, wenn außer der wirtschaftlichen und technischen Notwendigkeit auch der gemeinsame Wunsch bei Betreibern und Herstellern vorliegt.

In der chemischen Industrie sind die Voraussetzungen dazu besonders günstig, weil die Zusammenarbeit der Elektroingenieure auf beiden Seiten immer gut war und stets die Förderung seitens der Chemiker und Maschineningenieure fand.

Die erzielten Fortschritte liegen etwa auf folgenden Gebieten:

1. Die wegen des hohen Strombedarfs chemischer Prozesse notwendige weitere Senkung der spezifischen Anlagekosten konnte – gleiche Preisbasis zugrunde



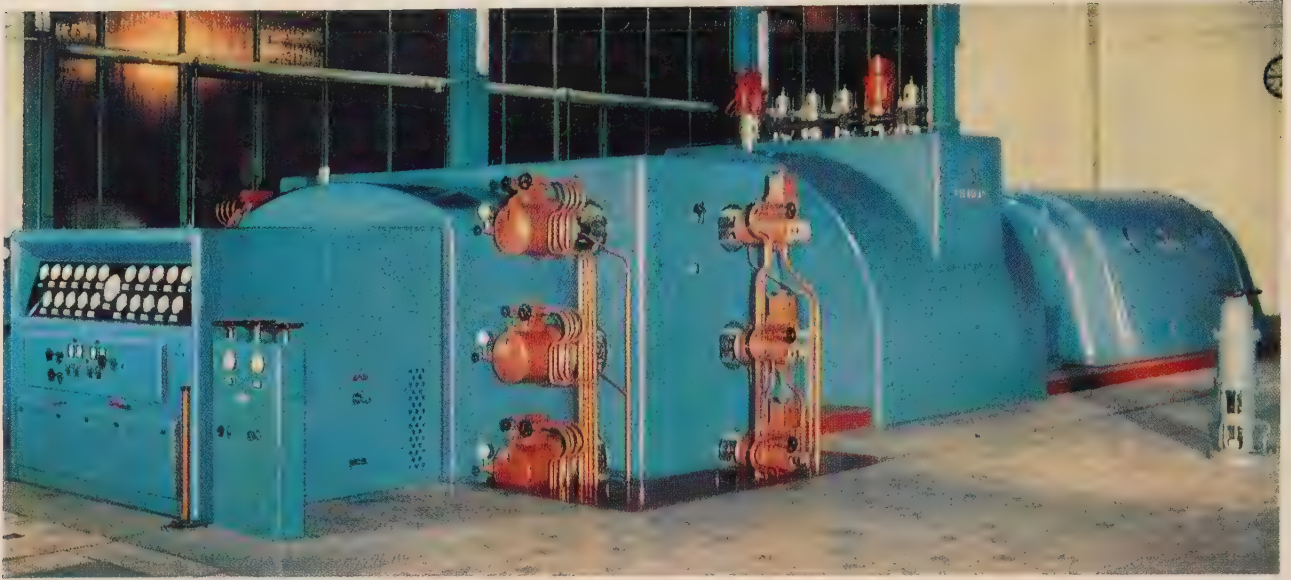


Bild 1 Entnahme-Gegendruck-Turbosatz, 21 MW, Frischdampf 150/180 atü, 640/650 °C, gesteuerte Entnahme bei 16 atü, Gegendruck 6 atü

- gelegt – bei gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades fortgesetzt werden.
2. Da die Beherrschung der durch die ständige Leistungszunahme ausgelösten technischen Probleme nur mit dem Übergang auf höhere Einheitsleistungen oder Spannungen, Stromstärken und gegebenenfalls Materialbeanspruchungen möglich war, wurden Neukonstruktionen eingesetzt.
  3. Die Automatisierung der Verfahren fordert einen stärkeren Einsatz der neuzeitlichen Steuerungs- und Regelungstechnik, besonders bei den elektromotorischen Antrieben. Hier wurde erfolgversprechende Entwicklungsarbeit geleistet.
  4. Für den Export vollständiger elektrischer Ausrüstungen in Entwicklungsländer sind Maschinen, Geräte und Anlagen den Verhältnissen des Bestimmungslandes anzupassen. Geeignete Maßnahmen wurden hier durchgeführt.

Die Siemens-Schuckertwerke haben der Lösung der Starkstromprobleme in der chemischen Industrie schon immer besondere Sorgfalt und größtes Interesse entgegengebracht. Die Aufgaben werden nicht nur in den Berechnungs- und Konstruktionsbüros oder in den Fertigungshallen und Prüffeldern der Fabriken, sondern auch in den Laboratorien und besonderen Entwicklungs- und Planungsabteilungen des Stammhauses behandelt und gelöst [1].

#### Stromversorgung

Der Stromverbrauch der chemischen Industrie Westdeutschlands hat sich in den letzten zehn Jahren mit einem Anstieg auf 20 Milliarden kWh im Jahre 1960

mehr als verdoppelt; die Chemie steht weit an der Spitze aller industriellen Verbraucher. Damit sind die Aufgaben der Stromversorgung gestellt: niedriger Strompreis bei ständig steigendem Leistungsbedarf.

In der Stromerzeugung werden – abhängig von den Energiequellen und Produktionsprogrammen – verschiedene Wege beschritten. In Westdeutschland ist man seit 1945 geneigt, sich auf die Ausnutzung des Heizdampfes in eigenen Gegendruckturbinen zu beschränken – allerdings in wirtschaftlichster Form –, wogegen der weit größere Rest der elektrischen Energie aus dem leistungsstarken Netz der öffentlichen Stromversorgung bezogen wird. Aus dieser Aufgabenstellung der chemischen Industrie ergab sich die Initiative zur Entwicklung der Hochtemperaturturbine mit 600 bis 650 °C Dampfeintrittstemperatur bei Drücken von 180 bis 300 atü. Die erste derartige Turbine ging bereits 1952 in Betrieb. Seitdem wurden allein von den Siemens-Schuckertwerken neun Maschinen aufgestellt oder in Auftrag genommen (Tafel 1).

Anzahl	Leistung MW	Druck atü	Frischdampf- temperatur °C	Gegen- druck atü
1	11,4	160	625	31
3	14,0	180	650	31
1	16,5	325	620	118
1	28,5	185	615	19
2	21,0	180	650	6
1	17,8	230	560	65

Tafel 1 Siemens-Hochtemperaturturbinen in der chemischen Industrie



Dabei ist auch die Leistung der Gegendruck-Turbosätze erhöht worden, und zwar von ursprünglich 11,4 MW über 21 MW (Bild 1) auf etwa 30 MW. Obwohl die Anlagekosten und damit die Wirtschaftlichkeit solcher Dampfkraftanlagen infolge wechselnder Nickelpreise Schwankungen unterworfen waren, hat sich die Technik der Hochtemperaturturbinen bei der westdeutschen chemischen Industrie durchgesetzt und ist dort eine charakteristische Erscheinung. Für konventionelle Dampfturbinen im mittleren und unteren Leistungsbereich, wie sie beim Betrieb in Düngemittelwerken benötigt werden [2], haben die Siemens-Schuckertwerke vor einigen Jahren ein besonderes Dampfturbinenwerk in Wesel gebaut.

Die Fortschritte bei regelungstechnischen Einrichtungen von Dampfkraftanlagen, z. B. die Gegendruckregelung mit dem Regler TELEPERM\* Z (Zeigerregler), werden ebenso genutzt wie die bei Relaischaltungen, z. B. elektrische Entkopplungsautomatiken, die bei Störungen die Versorgung der lebenswichtigen Verbraucher gewährleisten.

Im Ausland liegen die Verhältnisse aber oft grundsätzlich anders. Bei der Errichtung neuer chemischer Werke in Gebieten ohne genügend leistungsfähiger Verbundnetze ist man auf den Bau eigener Kondensationskraftwerke mit Kondensations- oder Entnahmekondensationsturbinen angewiesen. Leistungen von 60 bis 70 MW sind bei solchen Kraftwerken keine Seltenheit. Für ein Chemiekraftwerk in Südeuropa sind z. B. zwei Turbosätze für je 64 MW in Arbeit. Bei der elektrometallurgischen Industrie ist man, ähnlich wie bei Zechenkraftwerken, bereits auf Leistungen von 150 MW gegangen. Gegen den Schritt noch weiter nach oben bestehen seitens der Turbinenhersteller keine Hemmnisse.

Die Ausnutzung vorhandener Wasserkraftvorkommen wie in Norwegen, Indien, Afrika u. a. ist für die elektrochemische und -metallurgische Industrie nach wie vor entscheidend. Die Fortschritte in der Hydrodynamik, im Bau von Wasserturbinen und Generatoren machen sogar den Bau neuer Großstufen anstelle mehrerer älterer Stufen kleiner Leistung trotz des aufzubringenden Kapitalaufwandes wirtschaftlich. In Norwegen wurden solche Umbauten bei den Stufen Svaelfoss III und Saaheim vorgenommen.

Bei den Stromverteilungsnetzen erfordert die Zunahme von Leistungshöhe und -dichte den Übergang auf höhere Spannungen. Die zahlreichen vor 1939 gebauten Chemiewerke erhielten Hochspannungsverteilungsnetze für 5 oder 6 kV, wobei die Generatoren der Eigenkraftwerke unmittelbar auf die 5- oder 6-kV-Hauptsammelschiene arbeiten. Diese Art der Netzgestaltung empfahl sich aber schon damals nur, wenn sich die Leistungshauptverbraucher, z. B. Großkompressoren, Elektrolysen oder Öfen in der Nähe des Kraftwerks befanden. Hochstromschaltanlagen für 600 und 800 MVA mit Strömen von 5 bis 7 kA sind aufgrund dieser Überlegungen entstanden.

Für die heutige Leistungskonzentration in ausgedehnten Werken der chemischen Großindustrie ist aber die Überlagerung von Netzen höherer Spannung, wie der Reihe 30 (25 und 30 kV) und 110, unumgänglich, in die auch die Generatoren der eigenen Kraftwerke über Kuppeltransformatoren oder die Überlandnetze einspeisen. Für 25 und 30 kV sind mehrere derartige Anlagen mit Kurzschlußleistungen bis 1500 MVA entstanden. Die 110-kV-Stützpunkte liegen – als über Kabel versorgte Innen-

\* Eingetragenes Warenzeichen

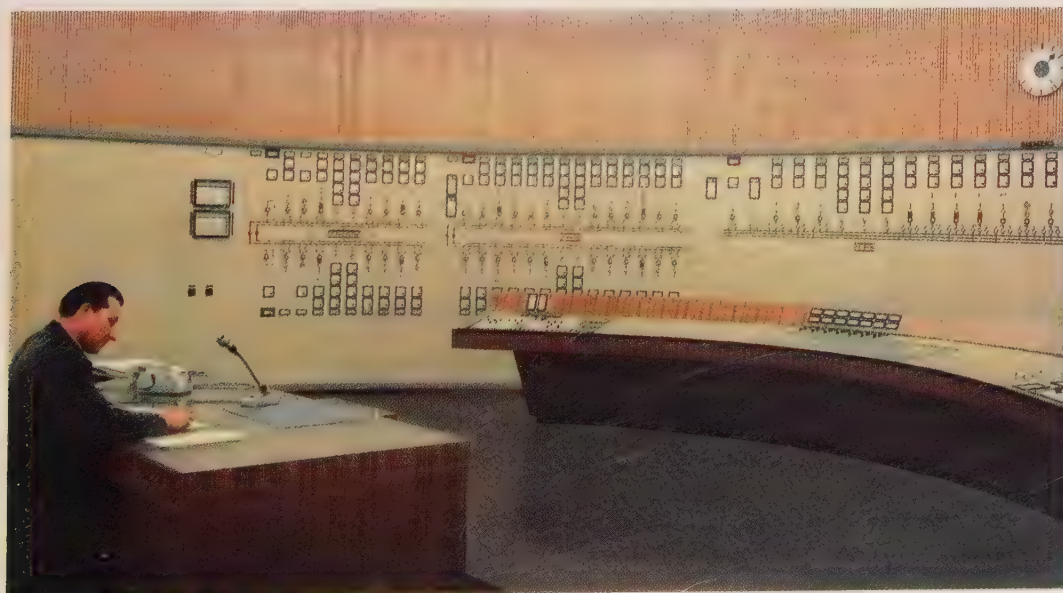


Bild 2  
Elektrowarte  
mit Anwahl-  
steuerung in  
einem Kraft-  
werk der  
chemischen  
Industrie





Bild 3 Stahlblechgekapelte Hochspannungsfelder mit Doppelsammelschiene, 200 MVA, 6 kV, in einem indischen Chemicwerk

raumstationen – ebenfalls mitten im Fabrikgelände. Große Werke mit Übergabeleistungen von mehreren hundert MVA werden neuerdings auch an das 220-kV-Überlandnetz angeschlossen.

Die zentrale Steuerung und Überwachung großer Netze kann übersichtlich nur in Elektroschaltwarten mit der Anwahlsteuerung (Bild 2) oder, als neueste optimale Lösung, mit der Anlagenbildsteuerung [3] unter Verwendung kontaktloser Logikelemente (SIMATIC\*) durchgeführt werden.

Die schweren Hochspannungs-Hauptschaltanlagen der Reihen 10 und 30 mit Nennausschaltleistungen der

Leistungsschalter von 600 bis 1500 MVA werden nach wie vor in offener Innenbauart erstellt, da sie ohnehin meistens in geschlossenen Schalthäusern untergebracht werden.

Stärkeren Eingang fanden in Chemiebetrieben die stahlblechgekapelten Hochspannungsschaltfelder für 100, 250 und 400 MVA als Unterverteilungen (Bild 3). Praktisch unentbehrlich sind sie für den Export, wenn vollständige elektrische Ausrüstungen für neue chemische Fabriken nach Übersee zu liefern sind, z. B. in die Entwicklungsländer Asiens und Afrikas, wobei noch die Verhältnisse des Bestimmungslandes (Feuchtigkeit, Kleintiere u. a.) berücksichtigt werden müssen.

Fortschritte brachten stahlblechgekapelte Hoch- und Niederspannungskombinationen mit angeflanschten Clophen-Transformatoren, sogenannte Schwerpunktstationen, die in den Verbraucherschwerpunkten aufgestellt werden können [2].

Bei Unterverteilungen für Niederspannung hat sich durch den stärkeren Einsatz von Antriebssteuerungen die Notwendigkeit zur Entwicklung eines großräumigeren, stahlblechgekapelten Kombinationssystems (EN-System) ergeben, in dem außer Sammelschienen, Sicherungen und Schutzschaltern auch Schütze, Relais und Regler für die Steuerungen Platz finden (Bild 4).

### Silizium-Gleichrichter für Elektrolysen

Die durchgreifendste Änderung in der Starkstromausrüstung chemischer Betriebe hat wohl die schnelle Entwicklung und Einführung des Silizium-Gleichrichters in der Gleichstromversorgung von Elektrolysen aller Art gebracht. Die Schnelligkeit dieser Entwicklung geht aus den kurzen Zeitabständen hervor, in denen sich die verschiedenen Gleichrichterarten ablösen. Seit Ende der zwanziger Jahre werden Quecksilberdampf-Gleichrichter für die Elektrolysen geliefert, 1935 folgten Kupferoxydul- und Selen-Gleichrichter, die vierziger und fünfziger Jahre brachten Kontaktumformer, die erstmals als Stromrichter Anlagenwirkungsgrade von 96 bis 97% bei mittleren Spannungen von 100 bis 400 V ermöglichten. 1955 kamen die ersten Germanium-Gleichrichter, und bereits im Juni 1957 wurde der erste Siemens-

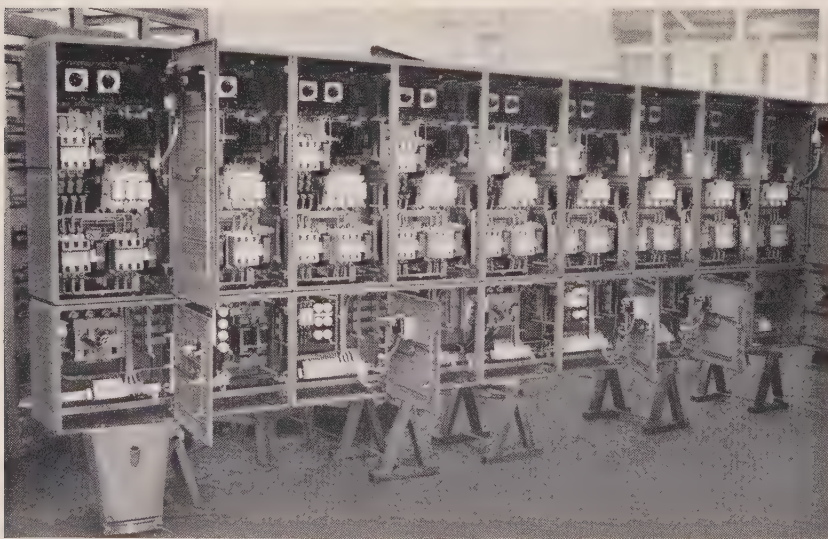


Bild 4 In EN-Gehäusen gekapselte Steuerungen für neun Zentrifugenantriebe eines chemischen Großbetriebes

\* Fingertages Warenzeichen



Silizium-Gleichrichter auf eine Chlorelektrolyse geschaltet. Seitdem wurden bei den Siemens-Schuckertwerken 60 Anlagen mit mehr als 2 Millionen A bestellt, von denen sich schon 40 in Betrieb befinden. Sie haben sich durchweg gut bewährt; die ältesten laufen jetzt mehr als drei Jahre und speisen Elektrolysen mit Spannungen von 50 bis 1000 V. Darunter befinden sich GroBelektrolysen für Aluminium und Chlor mit Stromstärken von 82000 bzw. 100000 A (s. Farbbild gegenüber Seite 317).

Bei allen Anlagen haben Silizium-Gleichrichter ihre für Elektrolysen günstigen Eigenschaften bewiesen, wie hohen Wirkungsgrad, Betriebssicherheit, niedrige Anlagekosten, Eignung für Fernsteuerung und Automatik. Schon heute kann man sagen, daß sie die ersten Gleichrichter mit gleich guten Eigenschaften in dem breiten Spannungsband zwischen 50 und 1000 V sind [4, 5], in dem sich vorher mindestens zwei Gleichrichterarten teilen mußten.

Die Spannungssteuerung erfordert beim Silizium-Gleichrichter allerdings einen größeren Aufwand, da nicht nur Stelltransformatoren zur Grobsteuerung, sondern auch besondere Transduktoren zur Feinregelung notwendig sind. Als Einleitertransduktoren werden sie normalerweise in Gleichrichtertransformatoren eingebaut, für die Sonderkonstruktionen entwickelt wurden. In der Kombination mit einem Transistor-Zweipunktregler und Magnetverstärker ermöglichten sie eine schnell wirkende Stromkonstantregelung hoher Regelgenauigkeit, die bei fast allen Elektrolysen mit Silizium-Gleichrichtern angewandt wurde und sich dort gut bewährt hat. Eine bemerkenswerte Weiterentwicklung ist die Stromprogrammregelung beim Formieren von Bleibatterien. Hier wird ein Strom-Zeit-Programm gefordert, das für jeden Plattentyp verschieden ist. Das Programm wird durch Lochkarten oder Programmstecker vorgegeben und läuft dann automatisch ab. Bei einer derartigen Anlage wird eine unregelmäßige Spannung von etwa 80 V mit einem Silizium-Gleichrichter für 3800 A als Grundlastgleichrichter erzeugt und eine Zusatzspannung bis maximal 40 V durch kleinere Zusatzgleichrichter für 200 A überlagert. Durch Ändern der Zusatzspannung wird mit Transduktoren und einem Transistor-Zweipunktregler auf konstanten Strom entsprechend dem eingestellten Programm geregelt.

Die Herstellung leistungsfähiger Hallgeneratoren auf der Grundlage der  $A_{III}-B_V$ -Verbindungen ermöglicht schon seit einiger Zeit die praktische Anwendung des Halleffekts zum genauen Messen hoher Gleichströme in Elektrolyseanlagen. Eine weitere Voraussetzung für die Genauigkeit der Messung ist aber auch ein gleichbleibender Steuerstrom mit höchstens 0,1% Abweichung. Die neuen Geräte auf Transistorbasis erfüllen jetzt auch diese Bedingung. Die zur Aufnahme der Hallgeneratoren vorgesehenen Hochstromjoche sind z. Z. bis 150 kA lieferbar, darüber hinaus empfiehlt sich die Summenmessung.

Die häufig gestellte Frage, ob in naher Zukunft mit einer weiteren neuen Gleichrichterart zu rechnen sei, ist zu verneinen. Jedoch gibt es beim Silizium-Gleichrichter noch Entwicklungsmöglichkeiten, z. B. in der konstruktiven Ausbildung der Geräte, der Anwendung spannungsgesteuerter Mehrschichtgleichrichter u.a.m.

### Ofentransformatoren für Reduktionsöfen

Die Süddeutschen Kalkstickstoffwerke, Trostberg, haben im Jahre 1957 Ofentransformatoren für unmittelbaren Anschluß an das 110-kV-Netz in Betrieb genommen. Es handelt sich einschließlich der Reserve um vier Einphasen-Einheiten von je 14,6 MVA mit einem Sekundärstrom von 60,8 kA. Damit wurde eine von den Siemens-Schuckertwerken seit vielen Jahren empfohlene wirtschaftliche Bauart zum ersten Mal in der Praxis verwendet. Diese Bauart bietet Vorteile im Wirkungsgrad und im Anlagekapital. Bei der früheren Bauart für eine Oberspannung von 10 bis 30 kV waren beim Anschluß an das 110-kV-Überlandnetz besondere Kuppeltransformatoren für z.B. 110/10 kV mit entsprechendem Schaltanlagenaufwand notwendig.

Aufgrund der guten Betriebsergebnisse in der süddeutschen Anlage entschloß man sich auch anderweitig zur Aufstellung ähnlicher Transformatoren für große Karbid- und Phosphoröfen. Zu erwähnen sind sieben Drehstromsätze für eine Leistung von je 60 MVA bei einem Sekundärstrom von 120 kA [6] und ein Einphasensatz mit der Gesamtleistung von 70 MVA mit einem Sekundärstrom von 75,3 kA. Die Entscheidung zwischen Drehstrom- und Einphasensätzen liegt bei den Betreibern, der Konstrukteur kann sich in allen Punkten anpassen. Da die Transformatoren dicht neben den Öfen stehen, muß die 110-kV-Spannung in Kabeln herangeführt werden. Die Ölkabelendverschlüsse [6] eines 110-kV-Drehstromtransformators sind auch gegen Porzellanklemmen zum Anschluß an eine Freileitung austauschbar. Eingebaute 110-kV-Ringstromwandler ermöglichen die Messung des Primärstromes. Gegen den Bau größerer 110-kV-Einheiten oder den unmittelbaren Anschluß an 220 kV bestehen keine Bedenken. Grenzen sind nur durch den Transport gezogen.

Die elektrischen Elektrodenregelungen haben durch die Entwicklung eines Dreipunktreglers mit minimaler Schalthäufigkeit eine weitere Bereicherung erfahren. Diese Einrichtung wertet die Regelabweichung nicht nach dem Augenblickswert, sondern nach Betrag und Zeitintegral aus und beschränkt dadurch die Zahl der Schaltbefehle auf ein Mindestmaß. Dabei wird eine hohe Mittelwertgenauigkeit erreicht.

### Antriebstechnik

Drehstrommotoren mit Käfigläufer sind nach wie vor die wichtigsten Antriebe in Chemiebetrieben.



Die schon vor 35 Jahren von den Siemens-Schuckertwerken hergestellten geschlossenen, rippengekühlten Drehstrommotoren wurden zwar im Laufe der Jahrzehnte weiterentwickelt, z. B. zu explosionsgeschützten Motoren der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« (Ex)e oder »Druckfeste Kapselung« (Ex)d, sind aber in der Grundkonzeption gleichgeblieben.

Ein wichtiger Schritt war die Normung der Anbaumaße entsprechend den IEC-Empfehlungen 72-1 und die Leistungszuordnung der oberflächengekühlten, explosionsgeschützten Käfigläufermotoren für Niederspannung nach DIN 42673 im Jahr 1960 [7]. Durch Verbesserung der Luftführung, bessere Anordnung der Kühlrippen und die damit verbundene Vergrößerung der aktiven Kühlfläche gelang es, die Leistungsgrenze dieser Motorbauart wesentlich zu erhöhen. Rippengekühlte Hochspannungsmotoren sind jetzt in Gußgehäusen bis 300 kW und druckfeste Motoren mit geschweißtem Gehäuse bis 500 kW (jeweils vierpolig) lieferbar [8].

Bei den Großmotoren für Turbo- und Kolbenkompressoren ging man im Laufe der Zeit mehr und mehr zur Vollkapselung über und baute die Luftkühler in das Ständergehäuse ein (Bild 5). Das äußere Aussehen der Motoren hat sich dadurch vollkommen gewandelt. Die Vorteile dieser Ausführung ergeben sich vor allem bei der Montage. Die Gesamtleistung der allein seit 1945 von den Siemens-Schuckertwerken an die chemische Industrie gelieferten Großmotoren beträgt fast 500 000 kW; davon haben die Synchronmotoren, die neben den Asynchronmotoren nach wie vor ihren Platz behaupten, einen Anteil von etwa 40%. Über die Entwicklung der Großmotoren, die Probleme der Isolation, der Entlärnung u. a. wird im einzelnen an anderer Stelle ausführlich berichtet [9].

Neu in der chemischen Industrie sind Überlegungen, die – aus verfahrenstechnischen Gründen – einen stärkeren

Einsatz elektrischer Antriebe mit veränderlicher Drehzahl betreffen. Schon bisher hat man hier und da auf Drehstrom-Kommutatormotoren zurückgegriffen, wenn ein gewisser Drehzahlstellbereich gefordert war. Mit der Errichtung und Ausweitung der Produktionsanlagen für die Kunststoffe Polyäthylen und Polypropylen wurden erstmals geregelte Gleichstromantriebe in größerem Umfang eingesetzt. Die günstigste Möglichkeit der Drehzahlstellung ergibt sich dabei durch Ändern der Ankerspannung über spannungssteuernde Transduktoren, Quecksilberdampf-Gleichrichter oder Leonardsteuersätze. Zusätzliche Regelungsaufgaben, z. B. Druck- oder Mengenregelung durch Drehzahlregelung können mit den zahlreichen Neuentwicklungen auf regelungstechnischem Gebiet gelöst werden.

Für Leistungen bis etwa 250 kW, wie sie bei Rührwerken und Schneckenpressen in Betracht kommen, ist der Gleichstrommotor mit Transduktorspeisung technisch und wirtschaftlich vorteilhaft. Für größere Leistungen, z. B. bei Kolbenkompressoren, eignet sich besser der gittergesteuerte Quecksilberdampf-Gleichrichter. Für alle vorkommenden Leistungen stehen bewährte Stromrichtergeräte – ein- oder mehranodig – mit Transistor-Gittersteuersätzen [10] zur Verfügung.

Die verwendeten TRANSIDYN\*-Regler sind aus praktisch trägheitslosen Transistorverstärkern aufgebaut, lassen sich bequem einstellen und ermöglichen kurze Regelzeiten. Durch die Aufgliederung der Regelung in mehrere unterlagerte Regelkreise, deren Sollwerte vom jeweils überlagerten Regler vorgegeben werden, ist eine Anpassung an die schwierigsten Aufgaben ohne weiteres möglich. Für den Einsatz der TRANSIDYN-Regler im praktischen chemischen Betrieb kann auf langjährige Erfah-

\* Eingetragenes Warenzeichen

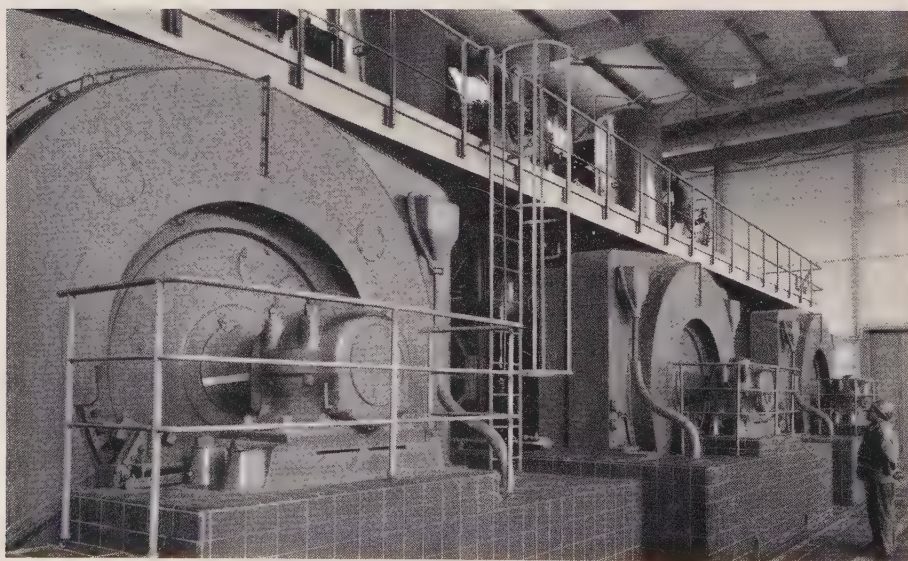


Bild 5 Kompressormotoren  
1300 kW, 6 kV, 245 U/min  
mit eingebauten Kühlern



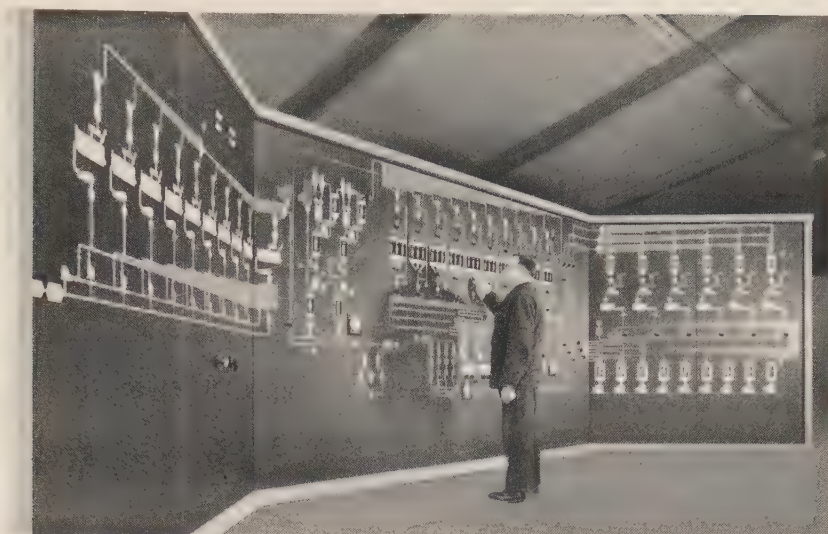


Bild 6 Leuchtwarte für ein Kunststoffwerk

rungen mit großen Walz- und Fördermotoren zurückgegriffen werden [11 bis 14].

Durch den Silizium-Gleichrichter ist der schon lange bekannte untersynchrone Drehstromregelsatz zu einem hochwertigen verlustarmen Regelantrieb für Herabsteuerung bis auf etwa 70 % der Drehzahl geworden. Solche Regelantriebe sind besonders für Turboverdichter geeignet. Die Schleifringleistung des Hauptmotors wird dabei über einen Silizium-Gleichrichter in Drehstrombrückenschaltung in Gleichstrom umgewandelt und dann entweder über einen rotierenden Umformer oder über einen Wechselrichter in das Drehstromnetz zurückgespeist oder – bei schnellaufenden Antrieben – über eine mit dem Hauptmotor gekuppelte Gleichstrommaschine in mechanische Leistung umgewandelt. Bei explosionsgeschützten Antrieben wird die Rückspeisung ins Netz vorgezogen, da die dazu notwendigen Einrichtungen unabhängig vom Motor in einem nicht explosionsgefährdeten Raum aufgestellt werden können.

Neue Möglichkeiten, zunächst für kleinere Leistungen, ergeben sich durch Speisung der Gleichstrommotoren mit steuerbaren Mehrschichtgleichrichtern auf Siliziumbasis.

### Antriebssteuerungen

Wegen der Automatisierungsbestrebungen in der Chemie hat das Interesse für das Gebiet der Antriebssteuerungen sehr zugenommen. Hierfür steht jetzt eine ganze Reihe geeigneter Befehlsgeber und Steuergeräte zur Verfügung. Steigende Bedeutung bekommt die Steuerungstechnik beim Transport und Mischen der Rohstoffe, Zwischenprodukte und Fertigerzeugnisse. Um den reibungslosen Durchlauf des Gutes innerhalb eines umfangreichen Produktions- und Förderabschnittes zu gewährleisten, empfiehlt sich der Einsatz von Leuchtwartensteuerungen

(Bild 6). Umfangreiche Schalthandlungen laufen selbsttätig ab, Fehlschaltungen werden vermieden, und der Betriebszustand der Anlage ist jederzeit leicht erkennbar. Die Kapselung und Unterbringung der Steuergeräte muß in Chemiebetrieben immer unter Rücksichtnahme auf eine etwa bestehende Korrosions- oder Explosionsgefahr vorgenommen werden. Das gekapselte EN-Verteilungssystem wurde bereits erwähnt. Für Steuerungen großen Umfangs und in explosionsgefährdeten Betrieben wird man die Steuergeräte in eigenen, nicht gefährdeten elektrischen Betriebsräumen zusammenfassen müssen, soweit hier nicht der Mehraufwand für explosionsgeschützte Verteilungen zwingend ist.

Neue Möglichkeiten für den Aufbau von Steuerungen ergeben sich durch die Verwendung logischer Elemente, wie sie das SIMATIC-System bietet. Sie bieten immer dann Vorteile, wenn es sich um sehr schnelle Vorgänge handelt, z. B. Zähleraltungen, die mit normalen Kontaktgeräten nicht mehr beherrscht werden können, oder wenn das Fehlen von Kontakten von entscheidender Bedeutung ist. Die ersten Ansätze zur Einführung des SIMATIC-Systems in Steuerungen der chemischen Industrie wurden bereits gemacht, z. B. bei der Anlaßautomatik großer Synchronmotoren. Hierbei wird die Frequenz des in dem Erregerkreis induzierten Wechselstromes ausgezählt und zu einer Kommandogabe ausgewertet. Unter Verwendung von SIMATIC-Bauteilen und Hall-Impulsgebern wurde auch eine digitale Winkelmeßeinrichtung für von Synchronmotoren angetriebene Kolbenkompressoren entwickelt. Sie ermöglicht außerdem das Einsteuern eines anlaufenden Motors in eine vorgegebene Winkellage. Der Vorteil gegenüber den bisher verwendeten Verfahren liegt nicht nur im Fehlen der Kontakte oder Schleifringe, sondern auch in der Möglichkeit, die Kurbelwinkel mehrerer Kompressoren gleichzeitig zu erfassen.



Schrifttum

- [1] Goeschel, H.: Beiträge der Starkstromtechnik zur industriellen Anwendung chemischer Verfahren. Siemens-Zeitschrift **29** (1955) 167 bis 174
- [2] Janisch, O. und Weber, K.: Über elektrische Ausrüstungen von Düngemittelfabriken. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 381 bis 387
- [3] Weiland, E.: Anlagenbildsteuerung – ein neues Steuersystem für Schaltanlagen. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 31 bis 39
- [4] Kleinvogel, H. J. und Pokorny, F.: Silizium-Gleichrichtergeräte großer Leistung in Einheitsbauweise. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 310 bis 315
- [5] Müller, E.: Silizium-Gleichrichter im Elektrolysebetrieb. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 317 bis 323
- [6] Sauer, A.: Ofentransformatoren für Karbidöfen hoher Leistung. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 453 und 454
- [7] Reinhardt, M.: Explosionsgeschützte Drehstrom-Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit«. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 350 bis 352
- [8] Döll, J., Lutz, K. und Stanzel, O.: Druckfeste Motoren für Nieder- und Hochspannung. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 353 bis 358
- [9] Bahr, G., Hübner, G. und Waltenberger, E.: Entwicklungsstand großer Drehstromantriebe für die chemische Industrie. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 333 bis 344
- [10] Hübner-Korney, R. und Meissen, W.: Ein Transistor-Gittersteuersatz für Quecksilberdampf-Gleichrichter. Siemens-Zeitschrift **31** (1957) 509 bis 512
- [11] Wesslak, F.: Der Antrieb von Kolbenverdichtern mit stromrichter gespeisten Gleichstrommotoren. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 344 bis 350
- [12] Offer, U., Watzinger, H. und Zabel, R.: Transduktor-Gleichstromantriebe mit TRANSIDYN-Regelung. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 648 bis 652
- [13] Kessler, C., Meinhardt, W., Neuffer, I. und Rube, G.: Die Gleichstrom-Fördermaschine mit Siemens-TRANSIDYN-Regelung. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 555 bis 562
- [14] Ströhle, D. und Vogl, H.: TRANSIDYN-Regelung für Walzwerksantriebe. Regelungstechnik **8** (1960) 194 bis 201

## Silizium-Gleichrichtergeräte großer Leistung in Einheitsbauweise

VON HANS JOACHIM KLEINVOGEL UND FRITZ POKORNY

Die Anwendung des Gleichstromes hat durch die Einführung des Silizium-Gleichrichters weitere Impulse bekommen [1, 2, 3, 4]. Das Umformen von Drehstrom in Gleichstrom in Stromrichteranlagen beim Endverbraucher geschieht nunmehr auf vielen Gebieten mit Silizium-Gleichrichtern. Sie sind anspruchslos im Betrieb und anderen Geräten hinsichtlich des Wirkungsgrades überlegen. Auch wegen ihres geringen Raumbedarfes und wegen der einfachen Reservehaltung werden sie in den meisten Fällen anderen Umformerarten vorgezogen. So haben sie die Kontaktumformer auf dem Gebiet der Elektrolysen völlig verdrängt. Die Quecksilberdampf-Gleichrichter verlieren jene Anwendungsgebiete, in denen sie bisher ungesteuert vorzufinden waren – z. B. bei der Bahnstromversorgung und bei Gleichstromnetzen. Auch Selen-Gleichrichter haben bereits bestimmte Teilgebiete über 100 V an die Siliziumtechnik abgetreten. Im Niederspannungsbereich und als Hochspannungsgleichrichter haben Selen-Gleichrichter in vielfältigen Formen noch an Bedeutung gewonnen, so daß z. Z. weniger eine Ablösung als vielmehr eine Ergänzung der technischen Möglichkeiten dieser beiden Halbleitermaterialien festzustellen ist.

Silizium-Gleichrichter sind also in weiten Bereichen der Gleichstromtechnik universell verwendbar. Es bedeutet einen weiteren Fortschritt, die Geräte für möglichst vielseitigen Einsatz zu entwickeln, um bei dem ständig steigenden Bedarf die passenden Geräte schnell zur Verfügung zu haben. Außer den geschilderten Vorteilen für den Anwender bieten Silizium-Gleichrichter auch für den Hersteller von Geräten gute Möglichkeiten, in einfacher Weise ein Geräteprogramm zu verwirklichen, wie es für andere Gleichrichter nicht möglich war. Beim Quecksilberdampf-Stromrichter z. B. führt jeder Versuch, die

Nennwerten des Gefäßes zu ändern, zu aufwendigen Neuentwicklungen. Aber bereits Selen-Gleichrichter konnten infolge der zulässigen Reihen- und Parallelschaltung von entsprechenden Selenplatten allgemein der jeweiligen Aufgabe angepaßt werden; ein einheitlicher Geräteaufbau war dabei allerdings noch nicht möglich.

Erste Voraussetzung für den Bau einheitlicher Silizium-Gleichrichter war die Bildung eines Typenprogramms entsprechender Siliziumzellen von etwa 0,5 bis 200 A (Mittelwert) [1]. Grundsätzliche Ergebnisse der Entwicklung hatten dazu geführt, daß z. Z. praktisch alle gefertigten Zellen mit einer Sperrspannung von 600 V Scheitelwert betrieben werden können. Für Geräte mit Leistungen von 1 bis 150 kW stehen Siliziumzellen von 0,5 bis 85 A (Mittelwert) zur Verfügung, mit denen die verschiedenen Schaltungen aufgebaut werden. Für höhere Leistungen wird die z. Z. größte Siliziumzelle mit 200 A Mittelwert bzw. 350 A Effektivwert verwendet. Leistungen über 300 kW werden durch Parallel- oder Reihenschaltung mehrerer dieser größten Siliziumzellen beherrscht; jedes Gerät ist also grundsätzlich aus Bausteinen aufgebaut. Der Wunsch, in diesen bausteinähnlichen Aufbau ein gewisses System zu bringen, war naheliegend.

Die Aufgabe war, die durch die hochsperrenden Siliziumzellen gegebenen einmaligen Vorteile in einer ebenbürtig einfachen Gerätetechnik voll auszunutzen. Hier setzten Überlegungen ein, die in der Silizium-Gleichrichtertechnik bei größeren Leistungen zu einem einheitlichen Geräteaufbau führten. Die Erfahrungen mit einer Vielzahl von Geräten gaben für diese Entwicklung die notwendigen Voraussetzungen.

Das Durchlaßverhalten der Siliziumzellen, die die Fertigung verlassen, ist so gleichmäßig, daß sie sich beliebig



parallel schalten lassen. Statisch ist also eine hinreichend gleichmäßige Stromaufteilung möglich. Um ohne besondere Maßnahmen für den Parallellauf auszukommen, genügt ein Sicherheitsabschlag von etwa 20% auf die Belastbarkeit.

Die Entwicklung der Schutztechnik führte zur Verwendung von Sicherungen [5]. Jeder Zelle ist dabei eine eigene Sicherung vorgeschaltet, deren Hauptaufgabe es ist, bei einer Störung die defekte Zelle selektiv herauszuschalten. Die Sicherungen fügen sich gut in das erstrebte Bausteinsystem ein. Jede Sicherung ist in ihrem Wärmewert ( $\int I^2 dt$ -Wert) der Zelle angepaßt. Der Widerstand solcher Sicherungen ist – bedingt durch die notwendigen Engstellen (Isthmen) in den Schmelzleitern – eine Funktion des Stromes. Die Verwendung solcher Sicherungen bringt zwei wertvolle Nebenwirkungen: Wegen ihrer besonderen Widerstandskennlinie tragen sie zur Stromstabilisierung beim Parallelschalten von Zellen bei, und wegen ihrer unbegrenzten Abschaltleistung erübrigen

sich die für den Schutz der Geräte sonst notwendigen Rückstrom-Schnellschalter.

Reicht bei höherer Betriebsspannung die Sperrfähigkeit einer Zelle nicht mehr aus, so ist eine Reihenschaltung von zwei oder mehreren Zellen erforderlich. Die Siliziumzellen sind für eine solche Reihenschaltung geeignet, vorausgesetzt, daß die Sperrspannung sowohl statisch als auch dynamisch gleichmäßig aufgeteilt wird. Da wegen des Trägerstaueffectes ohnehin zu jeder Zelle ein RC-Glied parallel geschaltet ist, kann diese Einrichtung bei entsprechender Bemessung der Kondensatoren die Aufgabe der Spannungsstabilisierung erfüllen. Die Reihenschaltung der Zellen mit ihren Beschaltungseinrichtungen fügt sich gleichfalls in den Rahmen des angestrebten Bausteinsystems.

Als letzte Voraussetzung für die konstruktive Entwicklung der Silizium-Gleichrichtergeräte seien noch einige grundsätzliche Überlegungen zur Kühlung vermerkt.

Für Siliziumzellen reicht wegen der hohen zulässigen Betriebstemperatur von etwa 140 bis 150 °C in den Kristallschichten bei Ausrüstung mit einem geeigneten Kühlkörper eine einfache Luftkühlung aus. Schon mehrfach wurde für Silizium-Gleichrichtergeräte eine Flüssigkeitskühlung mit Öl oder entionisiertem Wasser erwogen. Untersuchungen haben ergeben, daß die Geräte mit einer solchen Kühlung zwar noch gedrängter gebaut werden können, daß der Raumgewinn aber meistens in keinem Verhältnis zum Kostenaufwand steht. Durch eine Flüssigkeitskühlung würde auch die Einfachheit der Geräte leiden und die Wartung aufwendiger werden.

Die Raumaufteilung in Gebäuden für Gleichrichteranlagen wird im wesentlichen durch die Transformatoren bestimmt [6]. Die Bodennutzung eines Gleichrichtertransformators beträgt bei Wasserkühlung etwa 1,5 MW/m<sup>2</sup>, bei Luftkühlung mit Radiatoren etwa 0,5 MW/m<sup>2</sup>. Demgegenüber haben Silizium-Gleichrichtergeräte eine Bodennutzung von etwa 3,5 MW/m<sup>2</sup> bei Luftkühlung; ihr Raumbedarf ist also erheblich geringer, so daß in den meisten Fällen keine zwingende Notwendigkeit zur weiteren Verkleinerung im Hinblick auf den Raumaufwand der Transformatoren besteht.

Eine Flüssigkeitskühlung hätte nur dann eine gewisse Berechtigung, wenn z. B. Siliziumzellen nur für Sperr-

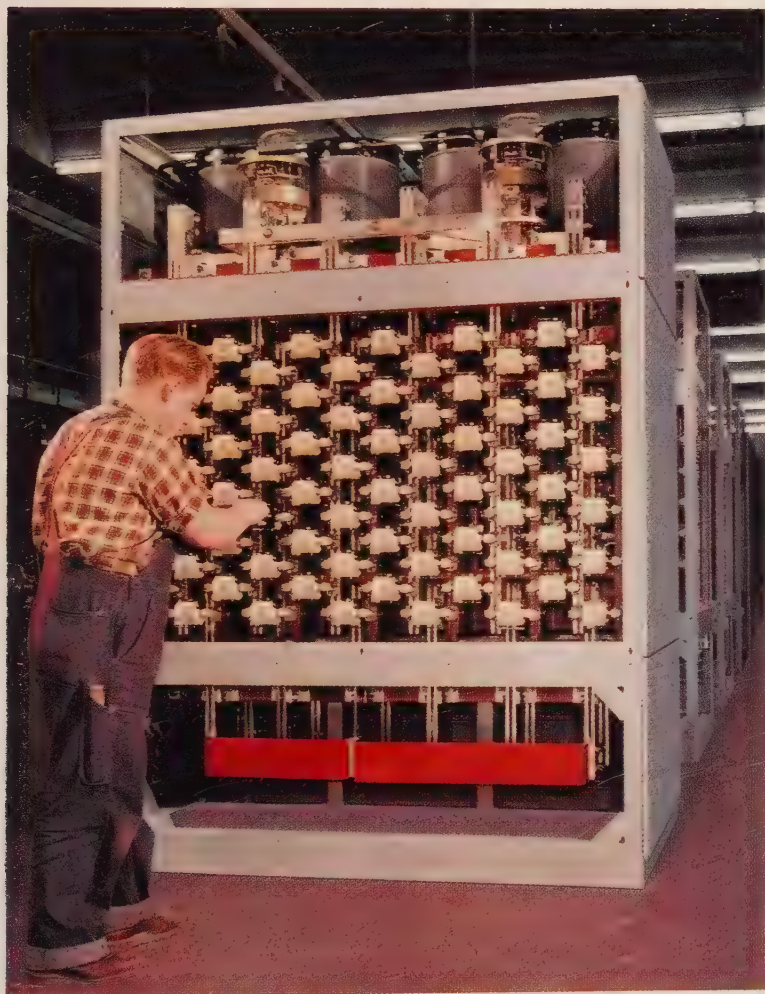


Bild 1 Zusammenbau eines Silizium-Gleichrichtergerätes 10 000 A, 500 V für Elektrolyse



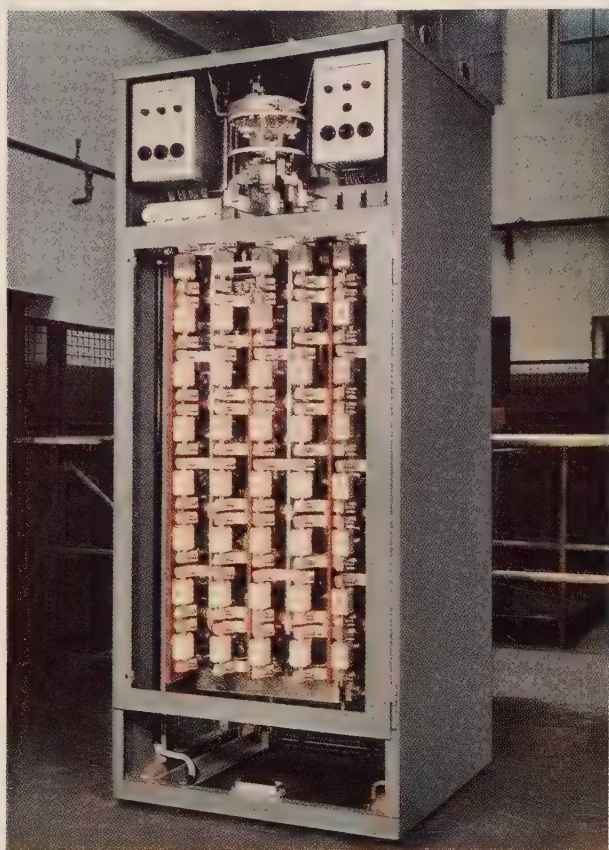


Bild 2 Silizium-Gleichrichtergerät 1400 A, 660 V für Bahnstromversorgung

spannungen von 200 bis 300 V Scheitelwert vorliegen würden. Dann stiege die Gesamtzellenzahl auf das Zwei- bis Dreifache, so daß wahrscheinlich wegen des notwendigen vielfachen Raumaufwandes und der doppelten und dreifachen Verlustmenge die Wahl einer Wasserkühlung zweckmäßiger sein könnte. Die hier beschriebenen Siliziumzellen mit hoher Sperrspannung ermöglichen demgegenüber die Verwendung einer unmittelbaren Luftkühlung. Damit ergeben sich übersichtliche Isolationsverhältnisse in den Geräten, ferner werden zweckmäßigerweise sämtliche Geräteteile einschließlich der Schienen und Sicherungen dem Luftstrom ausgesetzt, wogegen eine Flüssigkeitskühlung nur örtlich wirken und die Zellen erfassen würde, so daß die Kühlung des gesamten Gerätes nur unvollständig wäre.

Unter diesen Voraussetzungen konnte ein Geräteschema (Tafel 1) für Leistungen über 300 kW aufgestellt werden.

Aus der Anzahl  $N$  der insgesamt verwendeten Siliziumzellen ergibt sich die Leistung des Gerätes. Aus der

Schaltung sowie der Anzahl  $z$  der in Reihe angeordneten Zellen ergibt sich die Gleichspannung. Bis 250 V Gleichspannung kommen Sternpunktsschaltungen in Betracht, darüber wird fast ausschließlich die Drehstrombrückenschaltung verwendet. Die Anzahl  $n$  der je Zweig parallel zu schaltenden Zellen bestimmt letztlich den Strom. Die Gesamtzahl  $N$  der je Gerät verwendeten Siliziumzellen ergibt sich nach der Gleichung  $N = p n z$ , wobei  $p$  die Pulszahl der gewählten Stromrichterschaltung ist. Da die Geräte vorzugsweise sechspulsig sind, wird für eine bestimmte Betriebsspannung die Leistung des Gerätes durch Festlegen der Zahl  $n$  entschieden. Durch Staffelung der Gesamtzahl  $N$  mit Vielfachen von sechs ergeben sich alle ausführbaren Varianten. Bei mehr als 48 Zellen wird zweckmäßigerweise mit Vielfachen von 12 und von 96 Zellen an mit Vielfachen von 24 gesteigert.

Tafel 1 zeigt die bei den verschiedenen Spannungen ausführbaren Möglichkeiten. Varianten, auf die von vornherein verzichtet wurde, sind in Klammern gesetzt. Es sind die bei Vollausnutzung der Sperrspannung theoretisch erreichbaren Geräteleistungen angegeben. Diese Leistungen sind dann aufgrund der Parallelschaltbedingungen zu vermindern. Eine zweite Verminderung ergibt sich aus der Überlastung, die dem Gerät später zugemutet wird. Dabei bestimmen schließlich der Verwendungszweck und die gewählte Schutztechnik den Nennstrom des Gerätes. So wird z. B. in Elektrolysen von einem hohen Dauerstrom ausgegangen, wobei die Überlastungsforderungen sich aus der gewählten Schutztechnik ergeben. Bei Geräten der Bahnstromversorgung bestimmen außer dem Nennstrom besonders die Überlastungsvorschriften die Anzahl der verwendeten Zellen.

Konstruktiv waren Grundgrößen der Geräte festzulegen, in denen sich die erforderlichen Zellenmengen unter-

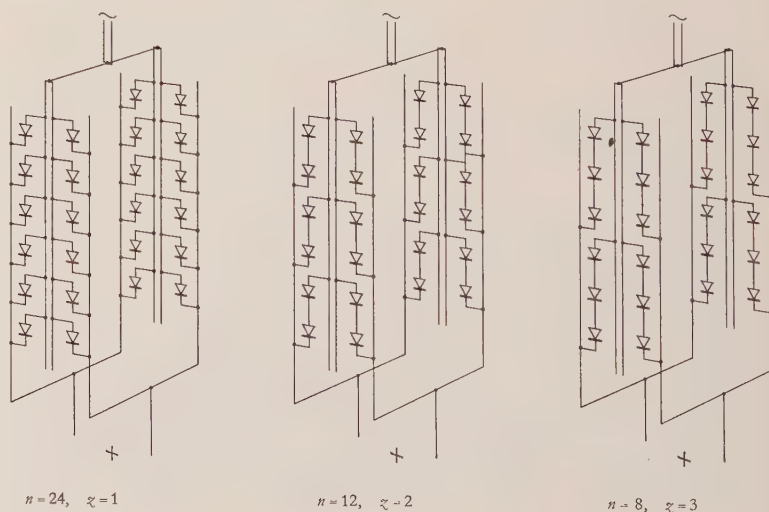


Bild 3 Aufbau der Silizium-Gleichrichtergeräte aus scheibenförmigen Zellengruppen



	Gesamtzahl <i>N</i> der Zellen	Theoretische maximale Leistung der Geräte  kW	Zellenzahl <i>n</i>								
			je Phase	je Zweig							
			Sechshe- phasige Sternpunkt- schaltung mit Saugdrossel	Drehstrombrückenschaltung							
Gleichspannungs- bereich	V		bis 250	bis 500	bis 1000	bis 1500	bis 2000	bis 2500	bis 3000	bis 3500	bis 4000
Reihenschaltung <i>z</i>			1	1	2	3	4	(5)	6	7	8
Kleines Gehäuse	6	300	1	1							
	12	600	2	2	1						
	18	900	3	3							
	24	1200	4	4	2	1	1				
Schrank*											
	Höhe 2200 mm	30	5	5				(1)			
	Tiefe 700 mm	36	6	6	3	2			1		
	Breite 800 mm	48	8	8	4		2				1
Schrank**											
	Höhe 2200 mm	60	10	10	5			(2)			
	Tiefe 1000 mm	72	12	12	6	4	3		2		
	Breite 800 mm	(84)	(14)	(14)	(7)					(2)	
Schrank**											
	Höhe 2200 mm	96	16	16	8		4				2
	Tiefe 1000 mm	108	18	18	9	6			3		
	Breite 1600 mm	144	24	24	12	8	6	(4)	4		3
Sonderausführung											
	168	8400	(28)	(28)	(14)		7			4	
	192	9600	(32)	(32)	(16)		8				4
	210	10500	(35)	(35)				(7)		5	
	240	12000	(40)	(40)	(20)		10	(8)			5

( ) Nicht ausgeführt  
\* Nur Vorderseite mit Zellen besetzt  
\*\* Vorder- und Rückseite mit Zellen besetzt

Tafel 1 Ausführbare Silizium-Gleichrichtergeräte mit Siliziumzellen für 200 A (Mittelwert) und 600 V (Scheitelsperrspannung)

bringen lassen. Die räumliche Dimensionierung war dabei weniger von den Zellen als vielmehr von den zugehörigen Kühlkörpern und Sicherungen abhängig. Aufgrund der Erfahrungen beim Bau vieler Geräte für bisher insgesamt 1000 MW für die verschiedensten Bedarfsfälle (vgl. Bilder 1 und 2) ergaben sich Einteilung und Maße der Schränke entsprechend Tafel 1.

Aus der Einteilung der Schränke ergeben sich bestimmte Schwerpunkttypen für die einzelnen Anwendungsgebiete. Die gewünschte Anzahl der Zellen innerhalb jeder Schrankausführung wird durch entsprechende Besetzung der möglichen Zellenplätze erreicht. Sowohl die Reihen- als auch die Parallelschaltung von Zellen wird räumlich in der Senkrechten innerhalb der gleichen Zellengruppe hergestellt (Bild 3). Die Anordnung solcher Zellengruppen nebeneinander dient einerseits zum weiteren Parallelschalten von Zellen zum Vergrößern der Anzahl *n*, andererseits zum Unterbringen der übrigen Ventilzweige im Gleichrichtergerät. Die kammartige innere Schienenführung (Bild 4) setzt sich auf geradem Weg bis in die dreh-

stromseitigen und gleichstromseitigen Anschlußstellen fort. Bei dieser grundsätzlichen Anordnung der Zellen im Gerät wirkt sich die Voll- oder Teilbesetzung der Zellenplätze – da sie alle Zweige der Schaltung gleichmäßig betrifft – in der Anzahl der besetzten waagerechten Zellenetagen aus. Die Konstruktion trägt im einzelnen folgende Merkmale:

1. Nach dem Einbau der Zellen bleibt die Wahl der Schaltung und Polarität des Gleichrichters grundsätzlich noch frei. Vorher ist im wesentlichen die Anzahl *N* der insgesamt verwendeten Siliziumzellen und damit die Gesamtleistung festzulegen. Dies wird dadurch möglich, daß die aktiven Teile wie Zellen, Sicherungen und Schienen elektrisch voneinander unabhängig aufgebaut werden. Die Schaltung wird erst durch Einlegen entsprechender Verbindungs-laschen hergestellt.
2. Der Nennstrom und die geforderte Überlastung bestimmen die Anzahl *n* der parallelen Zellen sowie den



Querschnitt der Schienen im Gerät. Es ist möglich, den Querschnitt der Schienen unabhängig von der Anzahl der Zellen und den übrigen Bauteilen dem jeweiligen Bedarfsfall weitgehend anzupassen.

3. Beim Parallelschalten vieler Zellen muß bei der Stromführung nicht nur auf die statische, sondern auch auf die dynamische Stromverteilung Rücksicht genommen werden. Eine Stabilisierung läßt sich im wesentlichen durch Ausgleich der Induktivitäten bewirken, was hier durch eine symmetrische Führung der einzelnen Stromkreise ohne zusätzliche Mittel rein konstruktiv gelöst werden konnte.
4. Die gleichmäßige Kühlung der Zellen wird durch eine gemischte Reihen- und Parallelschaltung der Kühlluftwege (Bild 5) gewährleistet. Durch die Querbelüftung werden auch die Sicherungen und Schienen in hinreichendem Maße gekühlt. Zwischen dem Lüfter und dem Gleichrichtersatz ist ein Luftkasten eingeschaltet, der für einen gleichmäßigen Unterdruck in allen parallelgeschalteten Luftwegen sorgt. Es wird eine Anzahl kleinerer Lüfter verwen-

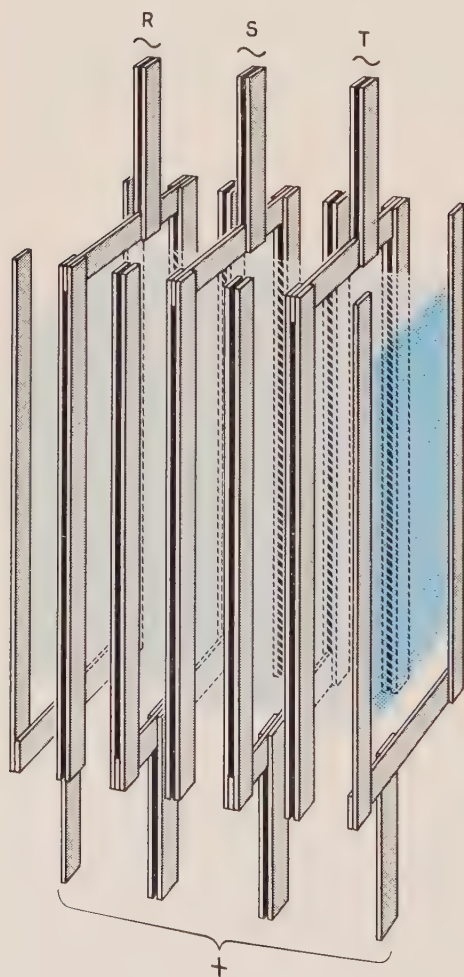


Bild 4 Schienenführung in einem Silizium-Gleichrichtergerät hoher Leistung

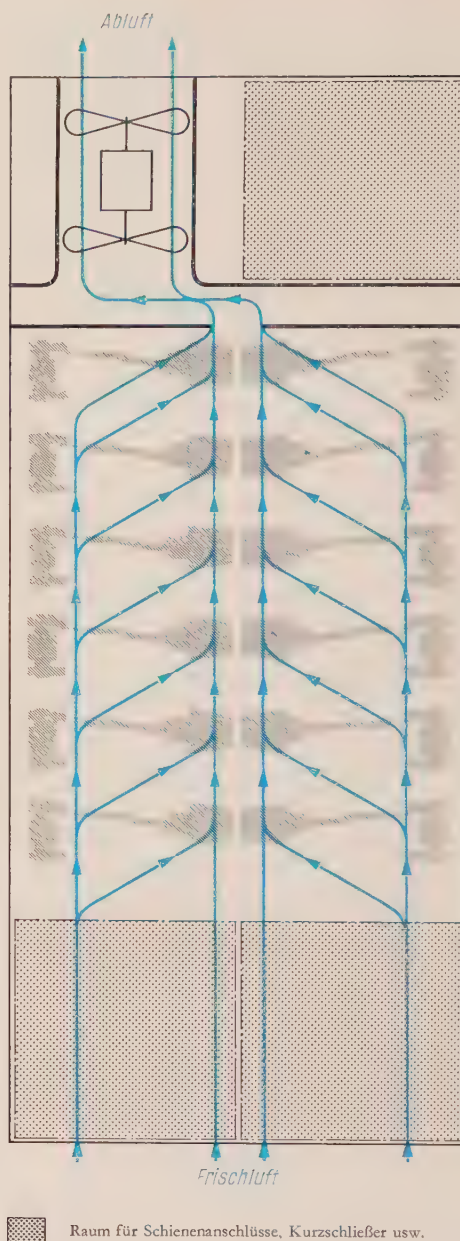


Bild 5 Belüftung eines Silizium-Gleichrichtergerätes

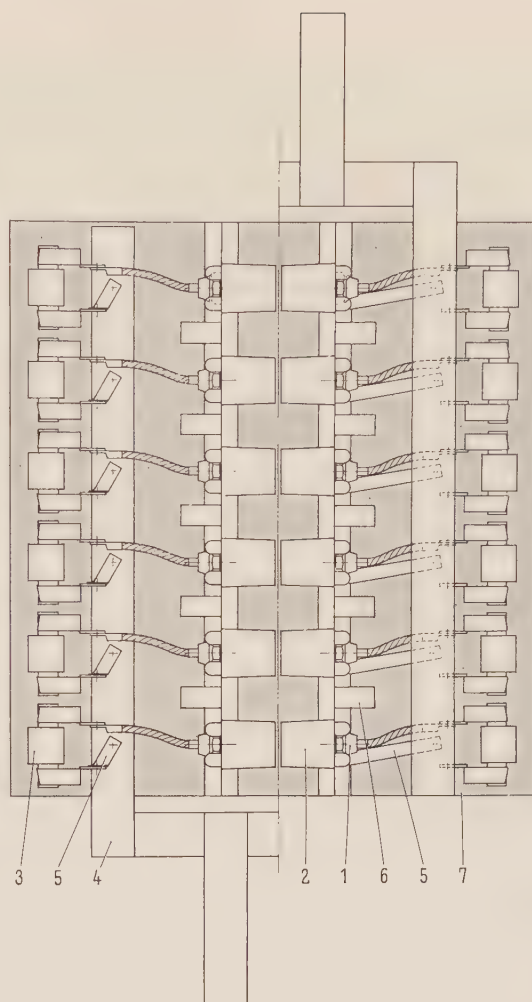
det, damit bei Ausfall eines Lüfters noch eine ausreichende Kühlung gesichert ist.

5. Bei der Auswahl des Materials für Gerüst und Verkleidung sind besonders bei den Hochstromgeräten die starken magnetischen Wechselfelder zu berücksichtigen. Um eine Erwärmung durch Wirbelströme zu vermeiden, wird der Rahmen aus Aluminiumprofilen hergestellt. Die für die Luftführung erforderlichen Gerüstabdeckungen bestehen teils aus Aluminiumblechen, teils aus Kunststoffplatten. Nur bei Geräten mit kleinen Nennströmen kann in herkömmlicher Weise Eisen verwendet werden.
6. Sämtliche Bauteile, die Anschlüsse an den Schienen und Kühlkörpern und die Beschaltungseinrichtungen



für den Trägerstauereffekt sind weitgehend normiert und damit für eine Vorfertigung geeignet. Außer den schon erwähnten elektrischen Verbindungen zwischen Zelle, Sicherung und Schiene sind auch die Isolierteile allgemein verwendbar. Jeder Gleichrichtersatz ist aus untereinander gleichen, vertikal angeordneten scheibenartigen Baugruppen zusammengesetzt (Bild 6).

7. Die Abdeckungen vor dem mittleren Geräteteil, der die Siliziumzellen enthält, sind durchsichtig, so daß die Sicherungen während des Betriebes bei geschlossenem Gerät beobachtet werden können. Hinter jeder Sicherung befindet sich die zugeordnete Zelle, die nach Entfernen dieser Sicherung zugänglich wird.
8. Die Gleichrichtersatz sind mit Rücksicht auf die großen Leistungen so gebaut, daß die Gleichrichterzweige durch isolierende Zwischenwände vollständig gegeneinander geschottet sind. Die Schottung ist aus Gründen der Lichtbogensicherheit bis über die Sicherungen hinaus durchgeführt.
9. Eine kräftige Verspannung des Gleichrichtersatzes einschließlich der Schienen sorgt dafür, daß die bei Kurzschlüssen auftretenden Stromkräfte keine Beschädigung zur Folge haben können.
10. Mit Rücksicht auf besondere Bedingungen der Anlagentechnik können Sondereinbauten, z. B. Kurzschließer oder Rückstrommeldewandler, vorgenommen werden. Dafür sind Räume vorgesehen, die sich oberhalb und unterhalb des Gleichrichtersatzes bieten. Diese Raumaufteilung innerhalb des Gleichrichtergerätes ermöglicht außerdem eine gute Anpassung der Drehstrom- und Gleichstromanschlüsse an die am Anlagenort gegebenen Verhältnisse. Die Stromführung kann von oben nach unten, in Sonderfällen aber auch umgekehrt verlaufen. Außerdem ist es möglich, sowohl die Gleichstrom- als auch die Drehstromanschlüsse unten anzuordnen.



- |                 |             |                       |
|-----------------|-------------|-----------------------|
| 1 Siliziumzelle | 3 Sicherung | 5 Laschen             |
| 2 Kühlkörper    | 4 Schienen  | 6 RC-Glied            |
|                 |             | 7 Isolierte Trennwand |

Bild 6 Seitenriß einer Zellengruppe (Zweig eines Silizium-Gleichrichters)

Rundanordnung mit konzentrischen Stromzuleitungen zu untersuchen. Der Aufbau in Schrankform ist jedoch wirtschaftlicher und aus fertigungstechnischen Gründen günstiger. Durch Einführung der beschriebenen Systematik wurde eine konstruktive Lösung gefunden, die für die meisten Bedarfsfälle verwendbar ist.

#### Schrifttum

- [1] Pfaffenberger, J.: Die Technik des Silizium-Gleichrichters. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 115 bis 122
- [2] Zenneck, H.: Erfahrungen mit Silizium-Gleichrichtern. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 122 bis 128
- [3] Hartmann, L.: Der Silizium-Gleichrichter zur Speisung von Gleichstrombahnen. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 217 und 218
- [4] Nitsche, E. und Pokorny, F.: Der Siliziumgleichrichter in der Stromrichtertechnik. ETZ-A **80** (1959) 506 bis 512
- [5] Horst, H.-A., Johann, H. H. und Schulze-Buxloh, W.: Schutz von Silizium-Gleichrichtern in Elektrolyseanlagen. ETZ-B **13** (1961) Heft 12 (in Vorbereitung)
- [6] Müller, E.: Silizium-Gleichrichter im Elektrolysebetrieb. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 317 bis 323
- [7] Rambold, W.: Die Bedeutung des Silizium-Gleichrichters für den Bau elektrischer Triebfahrzeuge der Industriefrequenz. VDE-Fachberichte **20** (1958) 122 bis 126

Die Einfachheit des Aufbaues war einer der Leitgedanken für diese Geräte. Die Erfahrung hat gezeigt, daß Ausfälle von Silizium-Gleichrichterzellen sehr selten vorkommen, so daß keine besondere Überwachung der einzelnen Zellen und Anzeige von Störungen notwendig ist. Es genügt, bei gelegentlichen Kontrollen vom Zustand der Sicherung auf die Funktionsfähigkeit der zugehörigen Zelle zu schließen.

Die entwickelten Einheitskonstruktionen für Silizium-Gleichrichtergeräte hoher Leistung berücksichtigen diese Gesichtspunkte. Dies schließt nicht aus, daß für bestimmte Sonderaufgaben andere Richtlinien maßgebend sind. So wurde beim Bau von Silizium-Gleichrichtern für einige Stromrichterlokomotiven eine Rundanordnung gewählt [7]. Die dynamische Stromaufnahme der einzelnen Phasen in den Hochstromgeräten führte dazu, auch eine





Silizium-Gleichrichteranlage 100 kA, 280 V für die Stromversorgung einer Chlorelektrolyse



## Silizium-Gleichrichter im Elektrolysebetrieb

VON EDUARD MÜLLER

Der Bedarf an Rohstoffen, die durch Elektrolyse in wäßriger Lösung oder im Schmelzfluß gewonnen werden, hat in den letzten Jahrzehnten sehr stark zugenommen. Da alle Elektrolyseprodukte stromintensiv sind und die Anlagen mit hoher Benutzungsdauer betrieben werden, sind die wirtschaftliche Umformung von Drehstrom in Gleichstrom und die Betriebssicherheit der Stromversorgung besonders wichtig [1].

Mit dem Siemens-Silizium-Gleichrichter steht der elektrochemischen und elektrometallurgischen Industrie seit etwa drei Jahren ein neuer Gleichrichter zur Verfügung, der wirtschaftlich und betrieblich allen anderen Umformer- und Gleichrichterarten überlegen ist. Er hat sich sehr schnell in aller Welt durchgesetzt und sich in mehr als 40 Anlagen mit über 830 000 A bei den verschiedensten Elektrolysen und bei Betriebsspannungen bis 1000 V ausgezeichnet bewährt.

### Eigenschaften und Bemessung

Der Silizium-Gleichrichter ist, wenn bei seiner Herstellung von Silizium-Einkristallen höchster Reinheit ausgegangen wird, ein nahezu idealer Gleichrichter. Er hat in Sperrichtung auch bei hohen Spannungen einen sehr großen Widerstand und damit niedrige Sperrverluste [2, 3]. Seine guten Durchlaßeigenschaften ermöglichen Stromdichten, wie sie sonst nur in metallischen Leitern üblich sind. Dabei sind die Durchlaßverluste infolge des geringen Spannungsabfalles so klein, daß bei richtiger Auslegung trotz der geringen Wärmekapazität des gleichrichtenden Siliziumscheibchens die Temperatur weit genug unter dem zulässigen Grenzwert bleibt und der reine Gleichrichter-Wirkungsgrad bei guter Ausnutzung der Sperrspannung etwa 99,5 % beträgt.

Bild 1 zeigt den Wirkungsgrad von Silizium-Gleichrichteranlagen, abhängig von der Anlagenspannung, und, zum Vergleich, die Wirkungsgrade anderer Gleichrichterarten. Die Werte beziehen sich nach VDE 0555/1936 auf die Gesamtanlagen und schließen die Verluste in den Transformatoren und Regeldrosseln ein. Mit dem Silizium-Gleichrichter, dessen Wirkungsgrad sogar den des Kontaktumformers übertrifft, kann also der Anteil der Stromkosten in Elektrolysen vermindert und bei gegebener elektrischer Energie ein Maximum an Produktion erreicht werden.

Weitere Vorzüge des Silizium-Gleichrichters sind seine hohe Betriebssicherheit und sein gutes Betriebsverhalten. Er ist leicht zu überwachen, einfach zu warten und für

jede Art von Fernbetätigung besonders gut geeignet. Er kann bei jeder Temperatur und ohne besondere Vorbereitungen sofort eingeschaltet und mit Vollast betrieben werden. Gegen Spannungsabsenkungen und Frequenzschwankungen ist er völlig unempfindlich. Die Geräte sind leicht und können ohne besondere Fundamente und Hebeeinrichtungen montiert werden. Die Anlagekosten von Silizium-Gleichrichtern sind niedriger als die von Kontaktumformern und nur wenig höher als die von Quecksilberdampf-Gleichrichtern. Für einen wirtschaftlichen Vergleich ist dabei zu berücksichtigen, daß wegen des geringen Raumbedarfes erhebliche Einsparungen an Baukosten möglich sind. Die jährlichen Gesamtkosten als Summe der Kapitalkosten, der Verlustkosten und der Unterhaltungs- und Personalkosten liegen in dem für Elektrolysen wichtigen Bereich erheblich unter denen anderer Gleichrichter- und Umformerarten.

Für Leistungsgleichrichter werden Siliziumzellen mit einem aktiven Querschnitt von 150 mm<sup>2</sup> entsprechend den erforderlichen Strom- und Spannungswerten zusammengeschaltet. Damit die Zellen in beliebigen Parallel- und Reihenschaltungen verwendbar sind, muß die Zellenfertigung gleichmäßige Sperr- und Durchlaßeigenschaften gewährleisten [4]. Eine größere Anzahl von Gleichrichterzellen wird zusammen mit den Schutz- und Überwachungseinrichtungen in einen Schrank eingebaut, des-

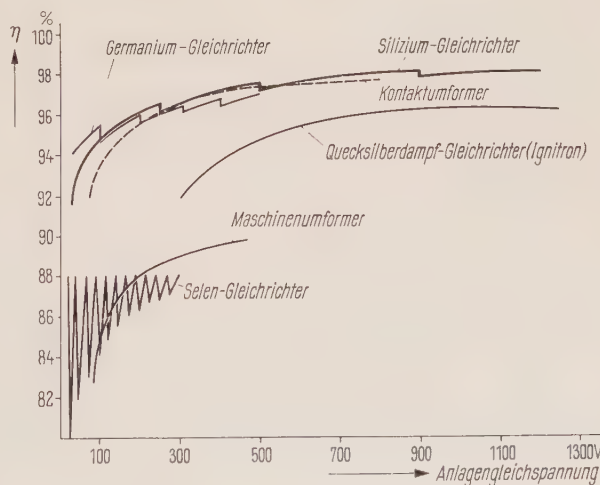


Bild 1 Wirkungsgrad von Umformer- und Gleichrichteranlagen für Elektrolysen



sen Abmessungen genormt sind [5]. Außer den Lüftern enthält ein derartiges Gleichrichtergerät keine bewegbaren Teile. Durch geeignete Wahl der Schaltung, durch Parallel- und gegebenenfalls auch Reihenschaltung von Zellen, durch Zuordnung mehrerer Schränke zu einem Transformator sowie durch Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichtergruppen können Silizium-Gleichrichteranlagen für alle Strom- und Spannungswerte gebaut werden, die normalerweise in der elektrochemischen und elektrometallurgischen Industrie üblich sind.

### Bedingungen des Elektrolysebetriebes

Die verschiedenen Arten von Elektrolysezellen unterscheiden sich in ihrem Spannungsbedarf und in den gebräuchlichen Stromstärken erheblich voneinander (Tafel 1).

Art der Elektrolyse	Zersetzungs- spannung V	Betriebs- spannung V	Stromstärke kA
Wasserstoffelektrolyse	1,6 bis 1,7	1,9 bis 2,6	2 bis 10
Chlorelektrolyse	3,1 bis 3,2	4,0 bis 4,8	10 bis 150
Aluminiumelektrolyse	1,5 bis 1,7	4,6 bis 5,0	30 bis 120
Magnesiumelektrolyse	2,7 bis 2,8	4,2 bis 4,8	10 bis 50

Tafel 1 Charakteristische Werte von Elektrolysezellen

Bei Wasserstoff- und Chlorelektrolysen liegt die Betriebsspannung etwa 20 bis 40 % über der Zersetzungsspannung. Bei der Aluminiumelektrolyse dagegen verhalten sich diese beiden Spannungswerte wie 1:3. Demgemäß verläuft die Kennlinie bei den zuerst erwähnten wässrigen Elektrolysen sehr flach, bei Aluminium aber erheblich steiler. Bild 2 zeigt die Strom-Spannungs-Kenn-

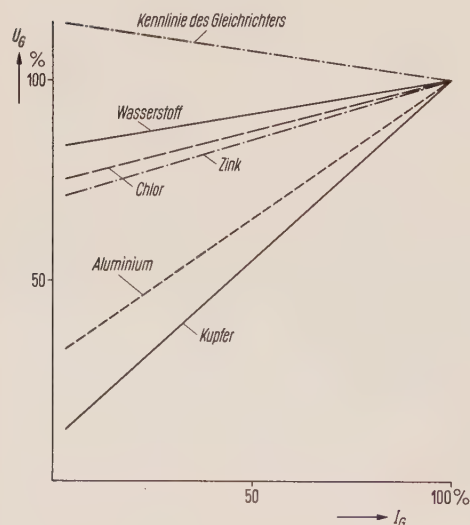


Bild 2 Strom-Spannungs-Kennlinien von Elektrolysen

linien einiger Elektrolysen und darüber die Kennlinie eines Silizium-Gleichrichters. Bei flacher Charakteristik führt bereits eine geringfügige Spannungsänderung zu einer starken Änderung des Elektrolysestromes. Die Spannung des speisenden Gleichrichters braucht also nur innerhalb eines verhältnismäßig kleinen Bereiches steuerbar zu sein, um alle Belastungszustände und auch begrenzte Schwankungen der Netzspannung beherrschen zu können. Soll dagegen beispielsweise der Strom in einer Aluminiumelektrolyse auf die Hälfte vermindert werden, so muß, entsprechend der steil verlaufenden Kennlinie, die Spannung bereits um etwa 30 % herabgesteuert werden. In beiden Fällen ist zusätzlich zu beachten, daß während des Betriebes Bäder und Öfen zu- und abgeschaltet werden müssen und daß sich dadurch der Spannungsbedarf des Elektrolysesystems ebenfalls ändert.

In wäßrigen Elektrolysen erfordern nachgeschaltete Produktionseinrichtungen häufig eine genau gleichbleibende Produktion. Diese kann über längere Zeit nur erreicht werden, wenn bei einer bestimmten Anzahl von Bädern der Badstrom konstant gehalten wird. Schmelzfluß-Elektrolysen arbeiten am wirtschaftlichsten, wenn die Gleichspannung bei sich änderndem Ofenwiderstand oder bei schwankender Drehspannung selbsttätig so geregelt wird, daß der Ofenstrom konstant bleibt. Es muß dann also auch der Anodeneffekt der Aluminiumöfen ausgeregelt werden, so daß die Gleichspannung in noch weiteren Grenzen veränderbar sein muß.

Werden neue Anlagen angefahren oder länger abgeschaltete Anlagen wieder in Betrieb genommen, so sind sowohl bei wäßrigen als auch bei Schmelzfluß-Elektrolysen hinsichtlich der Höhe der zugeführten Spannung besondere Bedingungen zu erfüllen, die entweder im Steuerbereich der Spannung oder in Form von zusätzlichen Einrichtungen (Polarisationsgleichrichter, Wasserwiderstand usw.) berücksichtigt werden müssen.

Die Elektrolysen werden im allgemeinen ununterbrochen Tag und Nacht mit Nennstrom betrieben, wenn nicht Energiemangel oder besondere Umstände dazu zwingen, dem Netz weniger Leistung zu entnehmen. Fällt die Gleichstromversorgung aus, so bedeutet dies stets einen Produktionsausfall. Häufig werden aber außerdem in der Elektrolyseanlage schwere Störungen und Schäden verursacht, deren Behebung langwierig und kostspielig ist. Betriebssichere Gleichrichteranlagen sind daher besonders für Elektrolysen von größter Bedeutung.

### Spannungssteuerung und Schutztechnik

Für die Spannungssteuerung des Silizium-Gleichrichters gibt es verschiedene Verfahren, die im wesentlichen auf der unmittelbaren Änderung der Sekundärspannung des Transformators und auf der magnetischen Teilaussteuerung beruhen. Bei der letzteren wird die sinusförmige Spannungskurve angeschnitten, so daß der Mittelwert der Spannung niedriger wird. Gut bewährt hat sich die



Kombination eines Regeltransformators mit Transduktordrosseln. Die Einleiterdrosselspulen können getrennt aufgestellt oder innerhalb des Transformators auf die Schienen zwischen Sekundärwicklung und Sekundärklemmen aufgeschoben werden. Sie sind mit einer gemeinsamen, einstellbaren Gleichstromvormagnetisierung versehen [6]. Der Spannungshub der magnetischen Regelung wird so gewählt, daß die normalerweise vorkommenden Last- und Spannungsschwankungen durch eine selbsttätige Stromkonstantregelung voll ausgeregelt werden können. Der Lastschalter braucht daher nur bei erheblichen Änderungen der Betriebsbedingungen, also nur selten zu schalten.

Die selbsttätige Stromkonstantregelung erleichtert auch den in größeren Anlagen unvermeidlichen Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichtereinheiten. Beim Ausfall einer Gleichrichtereinheit steigt der Strom in den anderen kurz an, wird aber von der Stromkonstantregelung in etwa 300 ms wieder auf den Sollwert zurückgeführt.

Die Spannung kann mit dem Stufenschalter des Gleichrichter-Transformators normalerweise auf etwa die Hälfte ihres Nennwertes eingestellt werden. Mit einem zusätzlichen Dreieck-Stern-Umsteller kann der Steuerbereich auf 1:3 erweitert werden. Wird ein noch größerer Steuerbereich gefordert, so empfiehlt es sich, dem Gleichrichter-Transformator einen Spartransformator mit Stufenschalter vorzuschalten. Anstelle der Einzelregelung kann auch Gruppenregelung verwendet werden, bei der mehreren Anlageneinheiten ein gemeinsamer Regeltransformator zugeordnet ist. Erfahrungsgemäß ist die Gruppenregelung wirtschaftlicher, wenn die Anlage aus mehr als vier Einheiten besteht.

Normalerweise wird die für eine Gleichrichteranlage benötigte elektrische Energie einem Netz mit konstanter Spannung entnommen. Die für die Steuerung der Gleichspannung erforderlichen Einrichtungen bedeuten immerhin einen nicht unerheblichen Aufwand. In Betrieben mit eigener Stromerzeugungsanlage ist daher zu überlegen, ob es nicht günstiger ist, einen Drehstromgenerator, die Gleichrichteranlage und die Elektrolyse elektrisch in Reihe zu schalten und die Gleichspannung unmittelbar

durch Ändern der Erregung des Drehstromgenerators zu steuern. Dieses Verfahren ermöglicht eine stufenlose Änderung der Spannung über den ganzen Bereich von der Remanenzspannung des Drehstromgenerators bis zu seiner Nennspannung.

Wird dieses Verfahren lediglich zum Anfahren der Elektrolyse verwendet, so genügt es (entsprechend den Erfordernissen des normalen Betriebes), billigere Gleichrichtertransformatoren mit kleinerem Steuerbereich einzusetzen oder sich auf Transduktorregelung zu beschränken.

Die massearmen Silizium-Gleichrichterzellen sind wegen ihrer kleinen Wärmespeicherefähigkeit nur wenig überlastbar. Sie müssen daher vor länger dauernden Überlastungen und hohen Kurzschlußströmen geschützt sein. Auch sogenannte innere Kurzschlüsse, wie sie entstehen, wenn eine Siliziumzelle ihre Sperrfähigkeit verliert, dürfen sich auf die Zellen in den übrigen Zweigen nicht nachteilig auswirken. Überflinke Sicherungen, integrierende Überstrom-Zeitrelais und Kurzschließer bilden bei richtiger Staffelung einen alle Störungsfälle eindeutig beherrschenden Schutz [7].

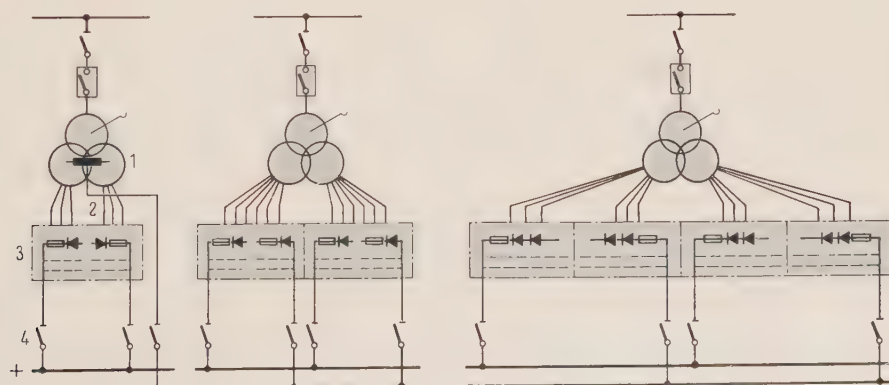
### Schaltung und allgemeiner Aufbau

Der normale Siemens-Gleichrichterschrank mit maximal 144 eingebauten Silizium-Gleichrichterzellen ist in Drehstrom-Brückenschaltung bei einer Gleichspannung bis zu 500 V für einen höchsten Strom von 10000 A ausgelegt. Für Spannungen zwischen 500 und 900 V sind je Brücken-zweig zwei Zellen in Reihe geschaltet, so daß für 10000 A zwei Schränke erforderlich sind. In Doppels-tern-Saugdrosselschaltung vermag dagegen ein Schrank bei Spannungen bis zu 250 V maximal 20000 A abzugeben.

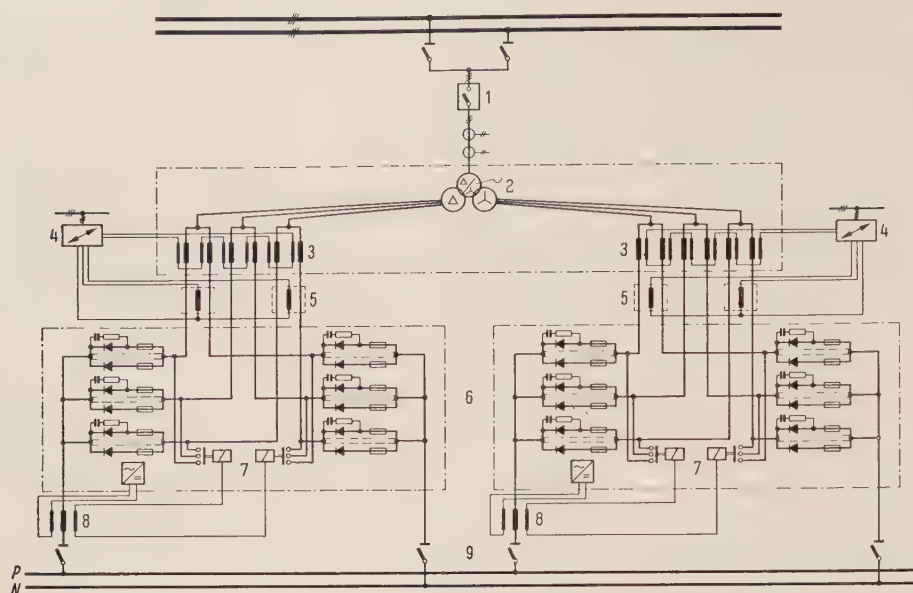
Eine Anlage für z. B. 20000 A besteht also, entsprechend der vereinfachten Darstellung in Bild 3, je nach der Höhe der verlangten Gleichspannung aus einem, zwei oder vier Gleichrichterschranken. Bei niedrigen Spannungen kann somit durch Parallelschalten mehrerer Schränke eine aus Transformator, Silizium-Gleichrichter und zugehörigen Regel-, Steuer-, Hilfs- und Überwachungseinrichtungen bestehende Anlageneinheit z. B. für einen Nennstrom

- 1 Gleichrichtertransformator
- 2 Verbindungsschienen
- 3 Silizium-Gleichrichterschrank
- 4 Schienendrehrenner

Bild 3 Abhängigkeit der Anzahl der Gleichrichterschranke von der Gleichspannung







- 1 Leistungsschalter
- 2 Gleichrichtertransformator
- 3 Transduktordrosseln
- 4 Stromkonstantregelung
- 5 Stromwandler
- 6 Silizium-Gleichrichter
- 7 Kurzschließer
- 8 Überstrom-Impuls-wandler
- 9 Schienendrehrenner

Bild 4 Grundsaltung einer Gleichrichtereinheit für 20000 A, 460 V

von 40000 A ausgelegt werden. In Anlagen mit sehr hohen Elektrolyseströmen arbeiten mehrere Anlagen-einheiten parallel auf eine gemeinsame Gleichstrom-sammelschiene.

Bild 4 zeigt die Grundsaltung einer Einheit für 20000 A und 460 V. Der Transformator hat dabei für die Grob-steuerung der Spannung in der Primärwicklung einen Stufenschalter und einen Dreieck-Stern-Umsteller. Die Transduktordrosseln für die magnetische Feinregelung sind mit dem Transformator zusammengebaut und im gleichen Kessel untergebracht. Der Gleichrichter selbst besteht aus zwei Schränken mit je 144 Siliziumzellen. In jedem Zweig der beiden Drehstrombrücken sind 24 Zellen parallel geschaltet. Zum Schutz gegen innere Kurz-schlüsse ist jeder Zelle eine Sicherung vorgeschaltet. Äußere Kurzschlüsse werden durch Kurzschließer erfaßt, die durch vormagnetisierte Überstromimpuls-wandler ausgelöst werden.

Arbeiten mehrere Gleichrichtereinheiten parallel, so kann der Anteil der Oberwellen durch Übergang auf eine höhere Pulszahl verringert werden. Um die Phasenlage der Sekundärspannungen der einzelnen Transformatoren entsprechend zu verdrehen, werden entweder getrennte Schwenktransformatoren aufgestellt, oder die Gleichrich-ter- oder die Spartransformatoren erhalten primärseitig Schwenkwicklungen. Auch bei sehr großen Anlagen geht man nur noch selten über eine 24phasige Rückwir-kung hinaus.

Bei der Planung von Silizium-Gleichrichteranlagen für Elektrolysen muß alles beachtet werden, was irgendwie zur Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit beitragen kann. So soll sich die Gleichrichteranlage in unmittel-barer Nähe der Elektrolyse befinden, um für die hohen Gleichströme die Übertragungsverluste niedrig zu halten.

Die Möglichkeiten, die der Silizium-Gleichrichter mit seinem geringen Raumbedarf und den dadurch niedrigen Baukosten bietet, sind weitgehend zu nutzen, ohne daß der klare und übersichtliche Aufbau der Anlage beeinträchtigt wird. Die Transformatoren werden zweckmäßi-gerweise im Freien aufgestellt, falls nicht großer Staub- und Schmutzanfall zur Unterbringung in geschlossenen Zellen zwingt. Die Drehstromschienen vom Transfor-mator zu den Gleichrichterschranken sollen wegen des Skin-effektes richtig aufgeteilt und wegen des ohmschen und des den Leistungsfaktor beeinflussenden induktiven Span-nungsabfalles möglichst kurz sein.

Auch die Gleichstromschienen, für die eine Strom-belastung von etwa 1,0 A/mm<sup>2</sup> bei Kupfer und etwa 0,5 A/mm<sup>2</sup> bei Aluminium üblich ist, müssen sorgfältig bemessen und möglichst günstig verlegt werden. Für Hauptsammelschienen aus Aluminium werden mehr und mehr gegossene Profile großen Querschnitts – bis zu 600 mm × 120 mm – verwendet.

Siemens-Silizium-Gleichrichter für Elektrolysen werden nur mit Luftkühlung betrieben, da die für die Silizium-zellen zulässige Betriebstemperatur weit über der norma-len Raumtemperatur liegt. Auf eine unmittelbare Küh-lung mit einer Flüssigkeit wird wegen der größeren Stör-anfälligkeit und der höheren Kosten bewußt verzichtet, zumal sie keine weitere Raumsparnis bringen würde, nachdem die Aufteilung des Gebäudes fast immer durch die Transformatoren bestimmt wird. Bei Frischluftküh-lung kann die Kühlluft durch Kanäle oder über die Stirn-seiten des Gleichrichtergebäudes angesaugt und nach oben abgeblasen werden. Bei stark verunreinigter oder sehr aggressiver Umgebungsluft wird häufig die in den Gleichrichtern erwärmte Luft in Wasserkühlern rückge-kühlt.



## Aufbau von Großgleichrichteranlagen

Die klaren Vorteile der Silizium-Gleichrichtergeräte hinsichtlich Gewicht, Raumbedarf, Kühlung, Betätigung und Wartung ermöglichen einen konstruktiv sehr einfachen Aufbau vollständiger Anlagen. An sich genügt ein eingeschossiges Gebäude, wenn die Schienen- und Luftführung in besonderen Kanälen möglich ist. Da jedoch Hauptsammelschienen, Regler- und Relaischränke, Drehtrenner und Rückkühleinrichtungen zweckmäßigerweise unterhalb der Gleichrichter untergebracht werden und oft auch Platz für die Hochspannungsschaltanlage und für Sonderräume erforderlich ist, wird bei großen Anlagen doch fast immer die Zweigeschoß-Bauweise gewählt.

Als Beispiel einer Großanlage zeigt Bild 5 den Übersichtsschaltplan und Bild 6 die bauliche Anordnung einer aus sechs Anlageneinheiten von je 18000 A bestehenden Gleichrichteranlage von 108000 A und 850 V für eine Aluminiumelektrolyse.

Das Gebäude ist im wesentlichen zweigeschoßig ausgeführt. Ein wassergekühlter Gleichrichter-Transforma-

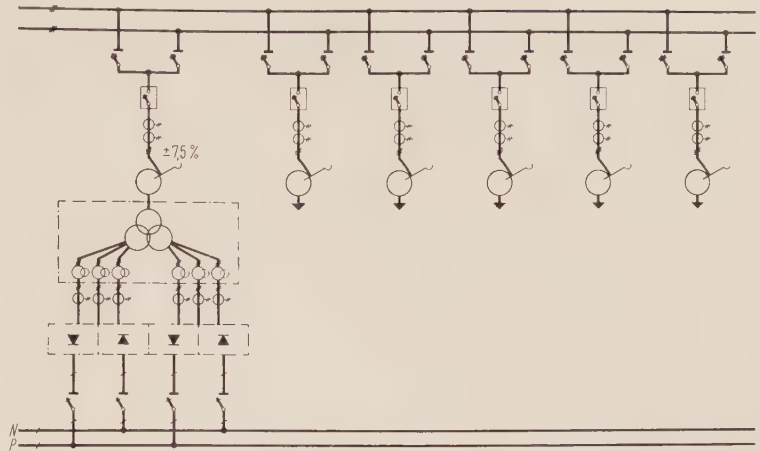
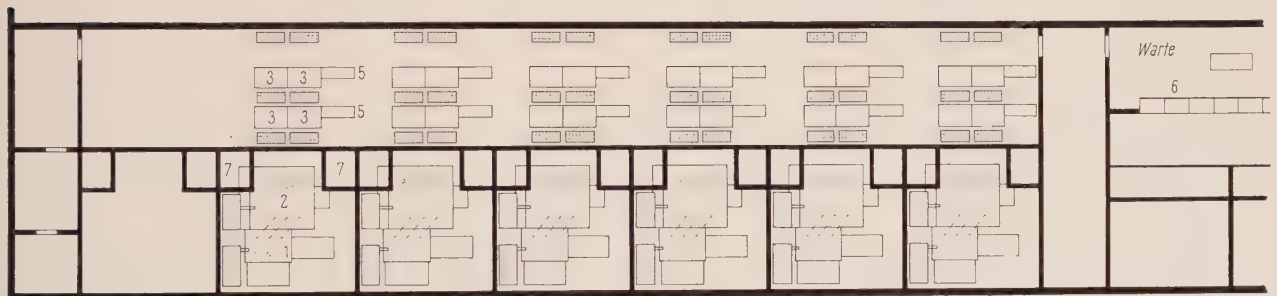


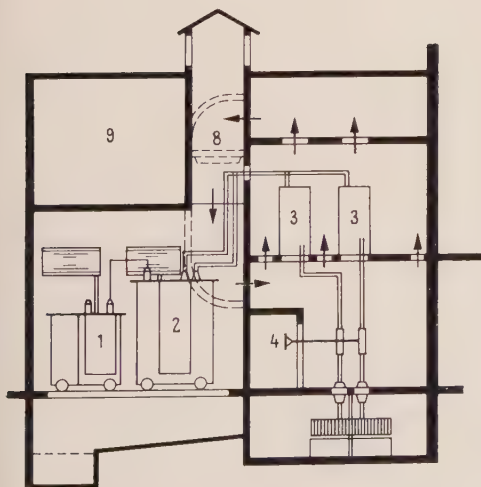
Bild 5 Schaltplan einer Großgleichrichteranlage mit sechs Anlageneinheiten

tor mit eingebauten Transduktordrosseln steht jeweils zusammen mit einem Spartransformator mit Stufenschalter in einer geschlossenen Zelle. Die zu einer Anlageneinheit gehörenden vier Gleichrichterschränke sind zusammen mit zwei Regler- und Relaischränken als Gruppe im eigentlichen Gleichrichterraum im Obergeschoß aufgestellt. Die Drehstromschienen sind von



- |                                  |                             |                                  |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 Spartransformator              | 4 Schienendrehrenner        | 7 Luftschächte für Umluftkühlung |
| 2 Gleichrichtertransformator     | 5 Regler- und Relaischränke | 8 Wasserkühler                   |
| 3 Silizium-Gleichrichterschranke | 6 Betätigungstafel          | 9 Hochspannungsschaltanlage      |

Bild 6 Aufbau einer Silizium-Gleichrichteranlage 108000 A, 850 V für eine Aluminiumelektrolyse



oben an die Gleichrichtergeräte geführt, die Gleichstromschienen über Drehtrenner mit den Hauptsammelschienen verbunden.

Mit Hilfe der Spartransformatoren, der Dreieck-Stern-Umschaltung in der Primärwicklung der Gleichrichter-Transformatoren und der Transduktordrosseln kann die Gleichspannung zwischen 40 und 850 V eingestellt werden. Je zwei der im einzelnen zwölfphasig arbeitenden Anlageneinheiten sind gegeneinander um 15° elektrisch geschwenkt, so daß sich für die Gesamtanlage eine 24-





Bild 7 Silizium-Gleichrichteranlage 54000 A, 300 V für eine Magnesiumelektrolyse

phasige Rückwirkung ergibt. Das speisende Netz wird also nur mit Stromoberwellen der Ordnungszahlen 23, 25, 47, 49 und höher belastet.

Die Gleichrichter werden mit Luft gekühlt. Die Luft wird im Kreislauf umgewälzt und in Kühlaggregaten, die oberhalb der Transformatorzellen in die Warmluftkanäle eingebaut sind, durch Wasser rückgeköhlt. Die Betätigungsfelder mit den Steuerschaltern, Meßinstrumenten und Meldetafeln sind in einer zentralen Warte zusammengefaßt.

Das Farbbild gegenüber Seite 317 zeigt eine andere Groß-Gleichrichteranlage, die mit 100000 A und maximal 280 V auf eine Chlorelektrolyse arbeitet.

Wegen ihres geringen Raumbedarfes können Silizium-Gleichrichter ohne Schwierigkeiten in vorhandenen Gebäuden anstelle veralteter Umformer oder Gleichrichter untergebracht werden. Dabei kann sich für den gleichen Raum ein erheblicher Gewinn an installierter Leistung ergeben. So stehen die drei in Bild 7 gezeigten Gleichrichtergruppen in einer großen Halle, in der sich früher mehranodige Quecksilberdampf-Gleichrichter befanden. Sie versorgen eine Magnesiumelektrolyse mit 54000 A bei einer höchsten Spannung von 300 V. Das Gebäude reicht in der Länge für fünf weitere Gruppen aus, so daß gegen-

über früher etwa die doppelte Gleichrichterleistung installiert werden kann. In der Breite und Höhe ist die Gleichrichterhalle nur zu einem Bruchteil ausgenutzt.

### Betriebserfahrungen

Die Siemens-Schuckertwerke haben Mitte 1957 und Anfang 1958 erstmals Silizium-Gleichrichter in Chlor- und Aluminiumelektrolysen eingesetzt. Die mit diesen Versuchsanlagen von 2000 und 6000 A Nennstrom gemachten guten Erfahrungen ließen bald erkennen, daß der Silizium-Gleichrichter mit seinen speziellen Eigenschaften für die Stromversorgung von Elektrolysen besonders geeignet sein dürfte und daß er andere Gleichrichterarten aus diesem Anwendungsgebiet in kurzer Zeit verdrängen wird. Von Mitte 1958 an wurden in rascher Folge weitere Anlagen mit Nennstromstärken von 3500 bis 50000 A und Spannungen von 75 bis 1000 V in Betrieb genommen. Anfang 1960 konnte eine Großanlage mit 82000 A und 750 V auf eine Aluminiumelektrolyse und wenig später eine mit 100000 A und 300 V auf eine Chlorelektrolyse geschaltet werden.

Die Betriebserfahrungen mit den bis jetzt in Betrieb befindlichen Anlagen sind ausgezeichnet. Sie haben im wesentlichen bestätigt, daß die vorher vermuteten Zusammenhänge zutreffend und die bei der Projektierung vorgesehenen Maßnahmen richtig waren. Die im Dauerbetrieb arbeitenden Anlagen sind mit mehr als 15000 Zellen ausgerüstet. Davon sind bis jetzt insgesamt nur 35 Zellen ausgefallen. Dieses günstige Ergebnis ist in erster Linie auf die Qualität des verwendeten Siliziums und auf die sorgfältig durchdachten und erprobten Fertigungsverfahren bei der Herstellung der Siliziumzellen zurückzuführen. Es beweist aber auch, daß die Faktoren, die bei der Auslegung der Geräte und Anlagen den Einfluß der Parallelschaltung, der Stromverdrängung, der Überspannungsbeanspruchung und der Überstrombelastung berücksichtigen, richtig gewählt wurden. Alterungserscheinungen waren in dem aus einem Einkristall entnommenen gleichrichtenden Siliziumplättchen nicht zu erwarten und sind auch nicht aufgetreten. Geringfügige Änderungen des an sich geringen Sperrstromes wirken sich im praktischen Betrieb nicht aus [8].

Das Zubehör, wie Schutz- und Überwachungseinrichtungen, Schalter, Relais, Lüfter usw., war der hohen Sicherheit des gleichrichtenden Elementes anzupassen und auf



das unbedingt Notwendige zu beschränken. Da eine Zelle, die ihre Sperreigenschaften verliert, durch die vorgeschaltete Sicherung einwandfrei und ohne Störung des Gleichrichterbetriebes selektiv herausgeschaltet wird, können Gleichstromschalter entfallen; dadurch wird der Anlagenaufbau weiter vereinfacht. Totalausfälle sind an sich schon viel seltener als bei Anlagen mit Kontaktumformern oder Quecksilberdampf-Gleichrichtern. Sie werden meistens durch schwere äußere Kurzschlüsse an den Gleichstromsammelschienen oder in der Elektrolyse verursacht. Wenn in Kauf genommen wird, daß in einem derartigen Störfall u. U. eine größere Anzahl von Sicherungen anspricht, dann kann auch auf die Kurzschließer verzichtet werden. Durch entsprechende Verlegung der Schienen, bauliche Maßnahmen und sorgfältige Betriebsführung können, besonders in großen Anlagen, derartige Kurzschlüsse weitgehend vermieden werden. Insgesamt sind die durch Silizium-Gleichrichter verursachten Stillstandzeiten äußerst gering, wie der praktische Betrieb bestätigt hat.

Die Betriebserfahrungen haben in ihrer Summe eindeutig bewiesen, daß Silizium-Gleichrichter zuverlässig, betriebssicher und anspruchlos sind und den besonderen Anforderungen des Elektrolysebetriebes technisch und wirtschaftlich voll gerecht werden.

#### Schrifttum

- [1] Gelissen, H.: Elektrotechnik, Elektrochemie und Elektrizitätsversorgung. ETZ-A 81 (1960) 849 bis 853
- [2] Spenke, E.: Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis. ETZ-A 79 (1958) 867 bis 875
- [3] Nitsche, E. und Zabel, R.: Eigenschaften und Anwendungen von Silizium-Leistungsgleichrichtern. ETZ-B 10 (1958) 108 bis 112
- [4] Pfaffenberger, J.: Die Technik des Silizium-Gleichrichters. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 115 bis 122
- [5] Kleinvogel, H. J. und Pokorny, F.: Silizium-Gleichrichtergeräte großer Leistung in Einheitsbauweise. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 310 bis 315
- [6] Feyertag, H.: Gleichrichtertransformatoren großer Leistung. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 121 bis 130
- [7] Nitsche, E. und Pokorny, F.: Der Silizium-Gleichrichter in der Stromrichtertechnik. ETZ-A 80 (1959) 506 bis 512
- [8] Zenneck, H.: Erfahrungen mit Silizium-Gleichrichtern. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 122 bis 128

## Kleinwartentechnik in Wärmewarten von Kraftwerken

VON MAX FRIEBEL, HORST KALTENECKER UND HANS SIEMS

Der Bau von Blockkraftwerken kennzeichnet die Entwicklungsrichtung der letzten Jahre im Kessel- und Turbinenbau. Im Blockkraftwerk werden ein oder zwei Kessel mit einer Turbine zu einer selbständigen Blockeinheit zusammengefaßt. Damit ist die Zentralisierung aller Steuer- und Überwachungseinheiten verbunden, die zur Führung des Kessels, der Wasseraufbereitung, der Turbine, der Eigenversorgung und der Energieverteilung notwendig sind <sup>1, 2)</sup>.

In neuerer Zeit ist man dazu übergegangen, nicht nur die Betätigungselemente für die Feuerung, den Kessel und die Turbine mit Reduzierstationen auf dem Steuerpult unterzubringen, sondern auch die für den Generator notwendigen Betätigungselemente. Die meist in offenem Rechteck angeordneten Standtafeln enthalten anzeigende und schreibende Meßgeräte, ferner die Gefahrmeldeanlage und in einem besonderen Teil die weniger häufig zu betätigenden Steuerelemente, z. B. für die Eigenversorgung und Energieverteilung mit den notwendigen Überwachungseinrichtungen.

Die Vielzahl von Reglern, Steuergeräten und Instrumenten führte zu einer Vergrößerung der Steuerpulte, wobei eine übersichtliche Gesamtanordnung nicht mehr in allen Fällen gefunden werden konnte. Steuerpulte von 6 bis 10 m Länge je Blockeinheit kennzeichnen diesen Entwicklungsstand. Das Betriebspersonal, im allgemeinen zwei Mann je Block, kann die notwendigen Informationen nur durch ständiges Auf- und Abgehen erhalten. Es ist daher erklärlich, wenn nachdrücklich gefordert wird, daß die Abmessungen der Steuerpulte und der Wartentafeln kleiner werden müssen.

### Forderungen an Überwachungs-, Steuer- und Regelanlagen

Zur Zeit werden Blöcke für 120 bis 150 MW gebaut. Es werden aber bereits jetzt erheblich größere Einheiten projektiert. Der Umfang der Steuer- und Überwachungsanlage nimmt damit ebenfalls zu, besonders weil Einrichtungen für die Meßwertverarbeitung und für die Automatisierung häufig vorkommender Anfahr- und Übergangsvorgänge sowie Anlagen-Leuchtbilder den Anblick einer neuzeitlichen Blockwarte abrunden (Bild 1). Bei der Planung von Warten sind heute verschieden gerichtete Erfordernisse zu berücksichtigen.

1) Merz, L.: Entwicklungslinien des Messens und Regels in der Wärme- und Verfahrenstechnik. VDI-Zeitschrift 102 (1960) 1423 bis 1432

2) Fischer, A., Friebel, M. und Keßler, Ch.: Regelungstechnische Aufgaben bei Blockkraftwerken. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 623 bis 629



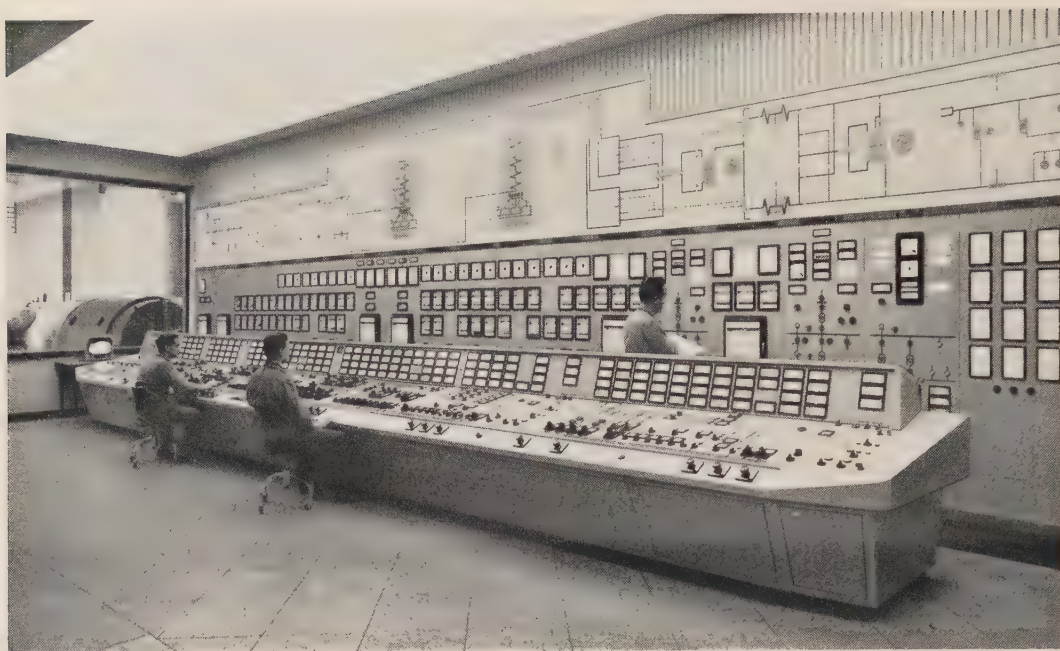


Bild 1  
 Wärmewarte  
 eines Industrie-  
 Kraftwerkes,  
 ausgeführt in  
 Starkstrom-  
 Steuertechnik

Zunächst stellt das Bestreben, die Steuer- und Überwachungsgeräte übersichtlich anzuordnen, immer wieder neue Aufgaben. Für den normalen Betrieb soll die Warte klein, aber übersichtlich sein. Alle wichtigen, den Betriebszustand kennzeichnenden Meßwerte müssen ständig sichtbar sein. Dagegen genügt es, die Werte weniger bedeutender Meßgrößen oder solcher Meßgrößen, die eine Information über das Verhalten eines Teiles der Anlage geben, über Umschalteneinrichtungen sichtbar zu machen. Über eine Gefahrmeldeanlage muß eine große Anzahl von Meßwerten und Schalterstellungen überwacht werden, damit Ausfälle im Betrieb örtlich begrenzt bleiben.

Beim An- und Abfahren des Blockes will man im Gegensatz zum Normalbetrieb möglichst viele Meßwerte sehen und genügend viele Eingriffsmöglichkeiten haben. Es wird dann mehr Personal am Pult eingesetzt als sonst, und auch dieses muß in der Lage sein, die Anlage zu bedienen. Das macht eigentlich im Gegensatz zur herrschenden Tendenz eine Vergrößerung des Steuerpultes notwendig. Ganz allgemein wird heute neben der notwendigen Betriebssicherheit der Betätigungselemente für die Regel- und Steuergeräte gefordert, daß wesentliche Bauteile mit möglichst einfachen Mitteln auszuwechseln sind. Ferner soll die Fehlersuche erleichtert werden, wobei fehlerhafte Bauteile ohne Prüfung schnell auswechselbar sein müssen, damit sie nachher in Ruhe geprüft werden können. Hinzu kommt noch, daß es bei größeren Anlagen immer häufiger notwendig wird, zusätzliche Teile nachträglich einzubauen oder Änderungen vorzunehmen. Welche Schwierigkeiten damit bisher verbunden sind, ist allen Betroffenen hinreichend bekannt.

### Möglichkeiten zur Verminderung des Platzbedarfs

Raumsparende Bauteile in Form von Doppelinstrumenten und kombinierten Vielfachschaltern in Frontrahmenabmessungen 72 mm×72 mm ermöglichten bei vergrößerten Einbautiefen den Bau kürzerer Steuerpulte. Auch bei geschicktester Anordnung der Schalter und Instrumente wurde jedoch sehr bald eine Grenze erreicht, die zu unterschreiten mit den herkömmlichen Mitteln der Starkstromsteuerung kaum noch möglich sein dürfte.

Hier öffnet der Übergang auf Schwachstromsteuerung den neuen Weg zur Kleinwartentechnik! Ein Versuch, Steuerelemente ähnlich der bisherigen Bauart, jedoch für Schwachstrom, zu verwenden, führte zu keinem Erfolg, da der Platzgewinn unbedeutend und die Steuerelemente weniger griffig waren. Außerdem mußten diese Elemente bei verkleinerter Grundfläche höher gebaut werden, wodurch die dahinterliegenden Anzeigeinstrumente zum Teil verdeckt werden und im Sitzen nicht mehr einwandfrei zu überblicken sind.

Eine Lösung war nur durch Änderung der Grundkonzeption für den Bau von Steuerpulten zu erreichen. Die Einführung von Steuerelementen mit Druckknopf-betätigung, der Übergang von Direktsteuerung auf Auswahlsteuerung in klarer Anordnung und vertretbarem Umfang sowie der Übergang vom üblichen geschlossenen Blindschaltbild auf ein Hinweisbild sind einige dieser Änderungen. Dabei wird in der Anordnung der Steuerelemente eine ausgeprägte Gruppenbildung angestrebt. Das gewählte Steuersystem liefert gleichzeitig die Voraussetzungen für eine Automatisierung der An- und Abfahrvorgänge.

## Ein neues Steuersystem

Aus Überlegungen, die mit der Automatisierung des gesamten Betriebes zusammenhängen, bietet sich der Übergang auf eine Schwachstromsteuerung an. Neben vielen anderen Vorteilen, die sie mit sich bringt, kann dabei reine Tastensteuerung vorgesehen werden. Die Taste hat sich als das griffigste Betätigungselement erwiesen, das bei funktionsgerechter Ausbildung auch auf kleinem Raum leicht zu betätigen ist. Reine Schwachstromsteuerung mit Kleinspannungen ermöglicht auch jederzeit Eingriffe in die Schaltung, ohne daß dabei der Betrieb stillgelegt werden muß oder Personen gefährdet werden können.

Mit den Mitteln der Schwachstromtechnik, z.B. mit Relais oder mit elektronischen Bauteilen, kann eine Anwahl von Steuerelementen ohne großen Platzbedarf verwirklicht werden. Es war nur ratsam, die Steuerelemente darauf durchzusehen, welche von ihnen unbedingt ständig griffbereit sein müssen, also nicht angewählt werden sollten. Bei der Entscheidung, ob im Einzelfall Anwahl-Steuerung oder Direkt-Steuerung richtig ist, muß eine ganze Reihe betrieblicher Gesichtspunkte beachtet werden. Es wird deshalb dasjenige System die meisten Vorteile haben, bei dem völlig frei für den Einzelfall entschieden werden kann, ob angewählt oder direkt gesteuert werden soll. Eine einmal getroffene Entscheidung sollte dabei auch nachträglich noch leicht geändert werden können.

Das alles legt ein Bausteinsystem nahe, bei dem bestimmte Bausteine hinzugefügt oder weggelassen werden, um eine Direkt-Steuerung oder eine Anwahl-Steuerung zu verwirklichen. Für die Steuerelemente und Meßelemente bedingt das einen Aufbau, bei dem beide allein oder in beliebigen Kombinationen eingesetzt werden können. Die Schaltung für die Steuerung muß sich aus immer wieder gleichen Teilstücken zu den verschiedensten Wirkungen zusammenfügen lassen. Ganz besonders bei Steuerungen mit enger Vermaschung untereinander, bei denen also mit vielen Verriegelungen zwangsläufige Kopplungen herbeigeführt werden müssen, ist das unerläßlich. Die Gesamtschaltung muß dabei klar und übersichtlich bleiben.

Die für den Überblick ständig erforderlichen Meßinstrumente werden in der notwendigen Stückzahl eingebaut. Alle anderen Meßwerte könnten dagegen auf eine Instrumentengruppe oder ein Einzelinstrument durch Anwahl aufgeschaltet werden. Das hat den Vorteil, daß sich der Ablesende auf den augenblicklich interessanten Meßwert konzentrieren kann, ohne von einer Vielzahl anderer Instrumente in unmittelbarer Umgebung abgelenkt zu werden.

Was die Meßinstrumente betrifft, muß außerdem noch überlegt werden, ob tatsächlich die laufende Anzeige

eines Meßwertes notwendig ist. Wenn nicht, kann sich die Anzeige genau so gut auf die Meldung von Grenzwerten beschränken. In solchen Fällen sollte ein Instrument durch Meldelampen ersetzt werden. Will man darüber hinaus eine eingehendere Information haben, wenn Grenzwerte über- oder unterschritten wurden, so kann die betroffene Meßstelle auf ein Instrument durch Anwahl aufgeschaltet werden. Selbstverständlich kann sich über die Grenzwertkontrolle die betroffene Meßstelle auch automatisch aufschalten.

Die vielfach bewährten TELEPERM\*-Regler mit ihrem Arbeits- und Meßkreis werden unverändert beibehalten. Den Übergang von Schwach- auf Starkstrom bilden steckbare Koppelrelais, die in der Nähe der Regler leicht austauschbar angeordnet sind. Sinngemäß gilt das gleiche auch für Klappensteuerungen, Schiebersteuerungen und Motorsteuerungen.

## Konstruktion mit bewährten und erprobten Bausteinen

Für den konstruktiven Aufbau der Steuerelemente konnten die Bauteile der Siemens-Gleisbildstellwerke eingesetzt werden. Sie sind für eine Technik mit ganz ähnlichen Forderungen entwickelt worden und haben den Vorzug, daß sie bereits in jahrelangem Einsatz ausgereift und erprobt worden sind.

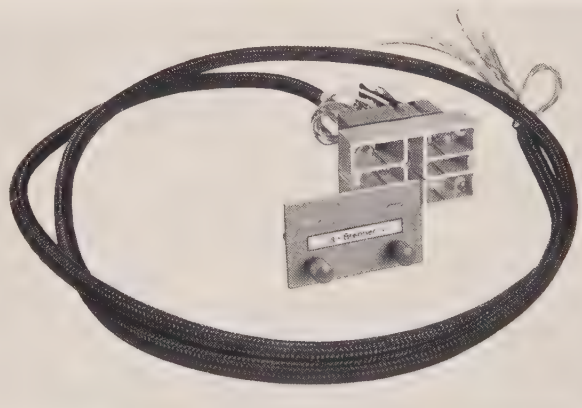


Bild 2 Tischfeld mit Deckplatte für ein Steuerpult in Kleinwartentechnik

Grundeinheit ist das Tischfeld (Bild 2), in dem bis zu 15 Meldelampen untergebracht werden können. Anstelle von je zwei Lampen kann jeweils eine Taste ihren Platz finden. Das äußere Erscheinungsbild der Pultplatte wird von den Deckplatten dieser Tischfelder geformt. Hinweis- oder Blindschaltbilder können freizügig auf den

\* Eingetragenes Warenzeichen





Bild 3 Platte eines Steuerpultes in Kleinwartentechnik mit Tisch- und Instrumentenfeldern, zum Teil noch offen

Deckplatten vorgesehen werden. Eine einheitliche Verdrahtung aller Tischfelder bis zu einem Lötstreifenverteiler im Pult stellt sicher, daß alle Felder untereinander ausgetauscht werden können. Zur Lagekennzeichnung der Tischfelder wird ein dem Schachbrett ähnliches Koordinatensystem benutzt. Dadurch sind Tischfeld und Anschlußstelle am Lötösenstreifen einander klar zugeordnet. Für die Lagerung von Ersatzteilen und bei Änderungen oder Erweiterungen ist das wichtig.

Für Relais- oder Transistorschaltungen genügt es, die Tasten einheitlich als Schließer auszubilden. Sie können dadurch einfach und robust gestaltet werden. Wenn in der gesamten Steuerung nur Schließer eingesetzt sind, kann man auch während des Betriebes jederzeit Deckplatten herausnehmen, ohne daß sich deshalb am Betriebszustand etwas ändert. Die Lampen sind dadurch jederzeit und ohne weiteres zugänglich, so daß sie leicht ausgetauscht werden können.

Über die aus der Gleisbildstelltechnik vorhandenen Tischfelder hinaus wurden Instrumentenfelder in Verbindung mit Steuertasten entwickelt, die sich in den Gesamtaufbau harmonisch einfügen. Sie nehmen den Platz von zwei oder vier Normalfeldern ein (Bild 3).

Für alle Steuerfunktionen, die sich in der Kraftwerksteuerung ergeben, sind entsprechende Deckplatten festgelegt. Diese tragen auswechselbare Schriftstreifen. Daher kann sich auch ein nicht ständig im Betrieb Tätiger leicht einen Überblick über die Anlage und die vorhandenen Steuertasten verschaffen.

#### Verbessertes Blindschaltbild

Bezugs- oder Hinweislinien und Symbole werden nach einem besonderen Verfahren griffest aufgespritzt. Alle

wesentlichen Symbole für das Hinweis- oder Blindschaltbild sind verfügbar. Wegen der strengen Zuordnung und Zusammenfassung in Gruppen kann man auf die bisher übliche Darstellung von Querverbindungen zwischen den Anlageteilen verzichten. Das ergibt eine Auflockerung des Bildes, eine übersichtliche Aufteilung in Funktionsgruppen und eine einfachere Darstellung. Es kann für manche Betriebe auch durchaus sinnvoll sein, von der herkömmlichen Strichdarstellung eines Blindschaltbildes ganz abzugehen. Um das Auffinden der verschiedenen Anlageteile zu erleichtern, könnten dann die Deckplatten der Steuerfelder in den Farben der Medien ausgelegt werden, deren Fluß jeweils gesteuert wird.

Weil alle Symbole des Blindschaltbildes auf Leerplatten angeordnet werden, ist auch das Blindschaltbild leicht zu

verändern. Das kann besonders in Betrieben, in denen häufig Änderungen des Betriebsablaufes oder des Erzeugnisses vorkommen, erhebliche Erleichterungen bringen.

#### Ständige Übersicht über den Betriebszustand

Alle für die Rückmeldung des erreichten Schaltzustandes vorgesehenen Lampen werden den entsprechenden Steuerfeldern zugeordnet. Auch wenn bei einer Anwahlsteuerung das Feld nur noch zur Anwahl auf ein gemeinsames Steuerfeld benutzt wird, bleiben die Rückmeldungen diesem Feld zugeordnet.

So hat man – unabhängig davon, ob angewählt oder nicht – einen ständigen Überblick über den gesamten Betriebszustand.

Für einen Motor wird z. B. der Meldeschlitz rechts neben der Taste rot ausgeleuchtet, wenn der Motor eingeschaltet ist. Der gleiche Schlitz wird weiß ausgeleuchtet, wenn der Motor ausgeschaltet ist. Durch Einfügen von Blinklicht wird eine sinngemäße Nachbildung des Steuerquittungsschalters erreicht.

Bei der Anwahlsteuerung konnte man auf eine Lampenüberwachung verzichten, weil das Zwei-Lampen-System angewendet wird. Für alle Rückmeldungen des Betriebszustandes muß immer entweder die rote oder die weiße Lampe leuchten. Wenn keine Lampe leuchtet, so kommt das einer Meldung für Lampenausfall gleich.

Bei Reglern wird in ähnlicher Weise wie beim Motor der Meldeschlitz links neben der Taste rot ausgeleuchtet, wenn der Regler eingeschaltet, und weiß ausgeleuchtet, wenn der Regler ausgeschaltet ist. Darüber hinaus wird

der Ausfall des Regler- und des Stellgliedschutzschalters durch Blinken der Lampen eindeutig gekennzeichnet.

### Freie Wahl der Steuerungsart

Beim Regler sind genau wie beim Motor drei Arten der Steuerung denkbar:

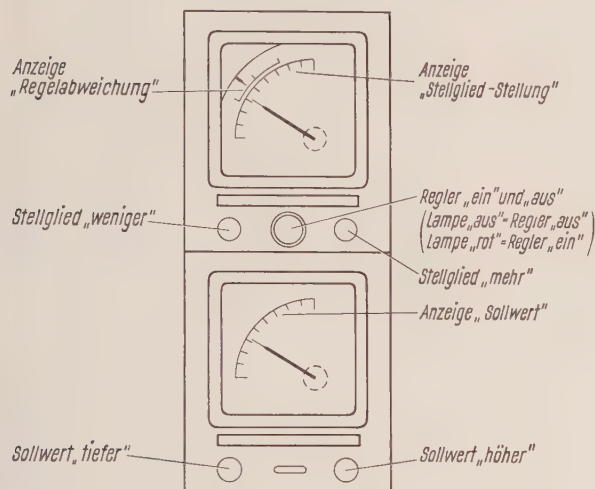


Bild 4 Zusammenstellung von Instrumentenfeldern für den Fall:  
»Regler und Sollwert direkt gesteuert«  
(Platzbedarf vier Normalfelder)

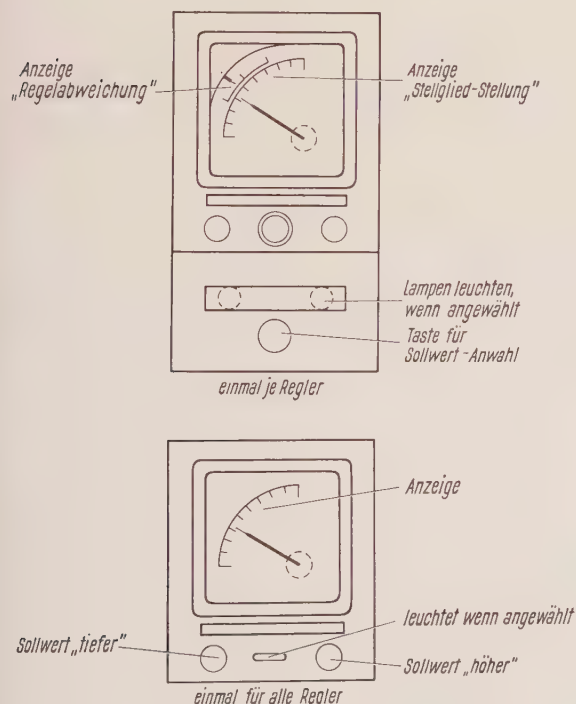


Bild 5 Zusammenstellung von Instrumentenfeldern für den Fall:  
»Regler direkt gesteuert, Sollwert angewählt«  
(Platzbedarf drei Normalfelder, dazu anteilig ein Steuerfeld)

a) Der Regler wird direkt gesteuert. Ein Steuerfeld enthält das Instrument für die Anzeige der Stellgliedstellung und der Regelabweichung sowie eine Taste für das Ein- und Ausschalten des Reglers und zwei Tasten für die Steuerung des Stellgliedes. Hinzu kommt ein zweites Steuerfeld mit einem Instrument für die Anzeige des Sollwertes. Von zwei darunter angeordneten Tasten aus kann der Sollwert verstellt werden. Der gesamte Platzbedarf entspricht vier Normalfeldern (Bild 4).

b) Der Regler wird direkt gesteuert, wie unter a), der Sollwert wird angewählt, wofür ein Normalfeld mit einer Taste vorgesehen ist. Ein Steuerfeld mit Instrument und zwei Tasten für die Sollwertverstellung ist dann allen Reglern gemeinsam. Hier kann wie unter a) die Regelabweichung und die Stellgliedstellung ständig beobachtet werden, die Anzeige des Sollwertes dagegen steht nur nach Anwahl zur Verfügung. Der Platzbedarf beträgt drei Normalfelder, dazu anteilig das Steuerfeld (Bild 5).

c) Regler und Sollwert werden angewählt. Für den Regler steht dann ein Anwahlfeld mit einer Taste und einem Meldeschlitz zur Verfügung. Der Meldeschlitz wird zur Kennzeichnung des Betriebszustandes rot oder weiß ausgeleuchtet. Ein allen Reglern gemeinsames Steuerfeld enthält ein Meßinstrument mit Anzeige der Regelabweichung und der Stellgliedstellung. Die Anwahl des Sollwertes wird immer gleichzeitig mit dem Regler von dem gleichen Normalfeld aus vorgenommen. Jetzt steht also die Anzeige eines jeden Reglers erst nach Anwahl zur Verfügung. Die zur Anwahl erforderlichen 10 ms spielen als Zeitverzögerung keine Rolle. In der sinnvoll hinsichtlich Anzahl und Umfang festzulegenden Anwahlgruppe steht immer nur ein Regler für die Anzeige und zum Steuern an. Der Platzbedarf beträgt ein Normalfeld, dazu anteilig zwei Steuerfelder (Bild 6).

Im Diagramm (Bild 7) ist der Gewinn an Pultfläche klar zu erkennen. So ist z. B. bei zehn Reglern für den Fall, daß Regler und Sollwert direkt gesteuert werden sollen, ein Platz von 40 Normalfeldern erforderlich. Auf 32 Normalfelder reduziert sich der Bedarf, wenn der Sollwert angewählt wird. Ganz entscheidend weniger Platz wird aber gebraucht, wenn Regler und Sollwert angewählt gesteuert werden. Dann sind nur noch 14 Normalfelder notwendig. Man hat also einen Platzgewinn von 65%. Mit steigender Anzahl der Regler nähert sich der Platzgewinn dem Wert 75%.

### Höchste Sicherheit in der Anwahlverriegelung

Bei den zur Anwahl auf das gleiche Steuerfeld vorgesehenen Reglern, Motoren oder sonstigen Steuerstellen muß sichergestellt sein, daß immer nur eine Stelle zur gleichen Zeit aufgeschaltet sein kann. Die vorher-



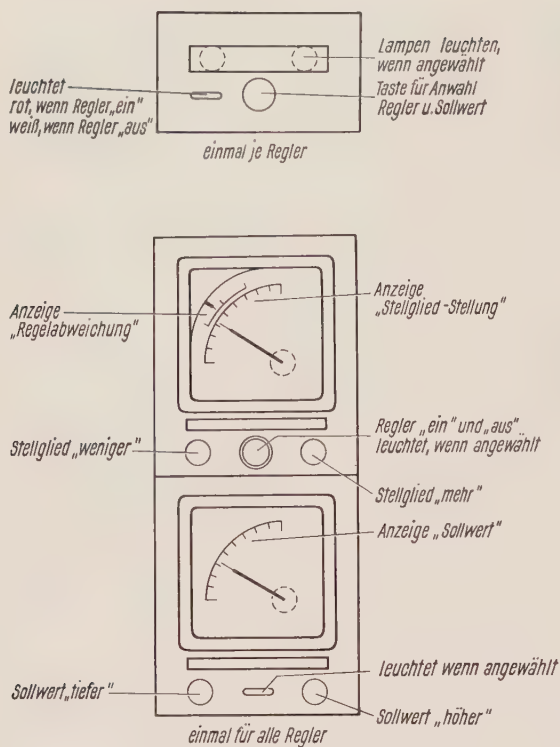


Bild 6 Zusammenstellung von Instrumentenfeldern für den Fall:  
»Regler und Sollwert angewählt«  
(Platzbedarf ein Normalfeld, dazu anteilig zwei Steuerfelder)

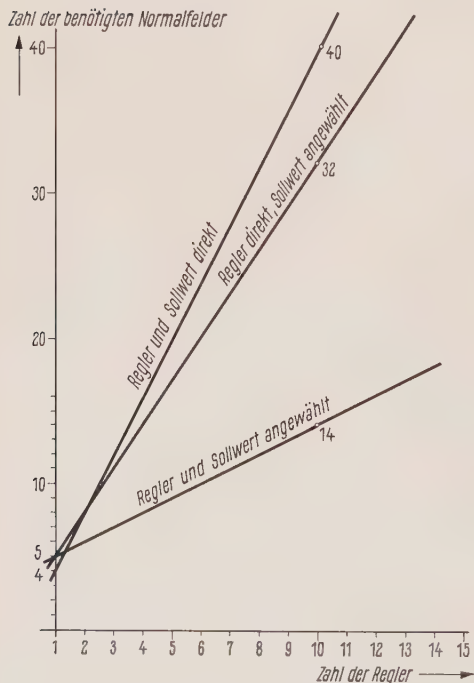


Bild 7 Platzbedarf auf der Steuerpultfläche bei den verschiedenen Steuerarten

gehende Einheit muß automatisch abgeschaltet sein, bevor die neu angewählte Einheit aufgeschaltet wird. Zur sicheren Verriegelung der Anwahleinheiten gegeneinander ist eine Transistor-Kippstufe mit Verstärker eingesetzt. Für jede Gruppe von Anwahleinheiten, die auf ein gemeinsames Steuerfeld aufgeschaltet werden, ist ein solcher Verriegelungsbaustein vorgesehen.

### Einfache und sichere Betätigung und klarer Aufbau der Schaltung

Wird die Anwahlsteuerung verwendet, so ergibt sich der Vorteil der zwangsläufigen Zwei-Knopf-Betätigung. Es muß immer zuerst eine Taste auf dem Anwahlfeld betätigt werden, ehe das eigentliche Steuerkommando dadurch ausgelöst wird, daß eine zweite Taste auf dem zugehörigen Steuerfeld betätigt wird. Bei dieser Art von Steuerung sind Fehlschaltungen durch unbeabsichtigte Betätigung von Tasten weitgehend ausgeschlossen, zumal sich außerdem die Druckknöpfe der Steuerfelder am unteren Rand der Rasterplatte befinden und durch geeignete konstruktive Gestaltung der Pultwange geschützt werden können.

Bei direkter Steuerung erreicht man gleiche Sicherheit dadurch, daß zusätzlich eine Freigabetaste vorgesehen wird. Ein Steuerkommando kann dann nur gegeben werden, wenn Steuertaste und Freigabetaste gleichzeitig gedrückt sind. Selbstverständlich können auch beide Systeme kombiniert werden.

Bei der Anwahlsteuerung werden neben den Steuerkommandos auch Meßwerte durchgeschaltet. Die gesamte Anwahlschaltung wird mit Relais aufgebaut.

Damit die Meßwerte immer sicher durchgeschaltet werden, haben alle Relais Edelmetallkontakte. Sie sind daher auch gegen Verunreinigungen durch aggressive Atmosphären weitgehend unempfindlich.

### Eindeutige Meßwertanzeige

Werden Motoren angewählt gesteuert oder soll dabei deren Stromaufnahme an einem Instrument abgelesen werden, so ist es notwendig, die verschiedensten Stromwerte auf derselben Skale darzustellen. Eine Einteilung von 0 bis 120%, wobei bei 100% eine rote Marke den Nennstrom des Motors kennzeichnet, ermöglicht gutes Ablesen. Ein Stromumsetzer, der eine solche Anpassung auf einfache Art vornimmt, wurde als kleine Baueinheit entwickelt. Diese Baueinheit ist zur Montage in der Schaltanlage vorgesehen, wo sich auch die Koppelrelais befinden. Die Leitungsverlegung kann bis zu dieser Stelle mit Fernmeldekabeln ausgeführt werden, was u. a. auch zu einem beträchtlich kleineren Rangierverteiler führt.

### Geschützte Unterbringung der Anwahlsteuerung auf kleinstem Raum

Die gesamte Relaischaltung für die Anwahlsteuerung ist in einem Schrank mit dem geringen Bodenflächen-

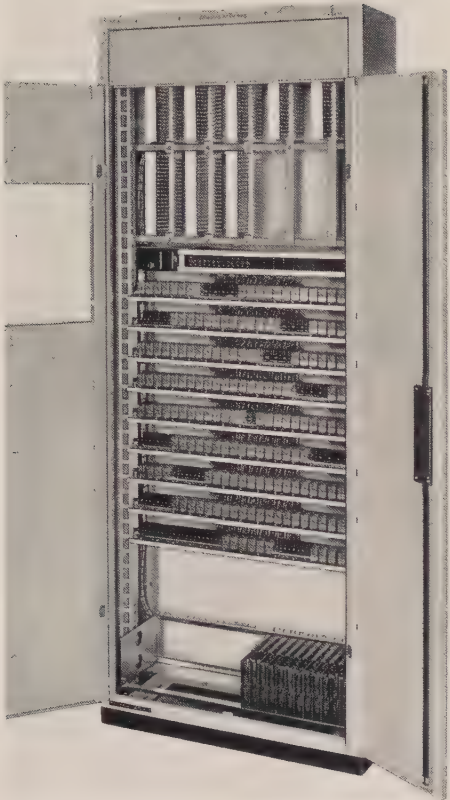


Bild 8 Anwahlschrank mit den Relais und Kippverstärkern für einen 120-MW-Block

bedarf von etwa 22 cm×60 cm untergebracht. Dieser Schrank enthält außerdem die über Stecker auswechselbaren Kippstufen mit Verstärker (Anwahl-Verriegelungsbausteine). Eine Montageleiste enthält alle Sicherungen für die Anwahlkreise. Diese Sicherungen sind als Schutzschalter mit Schalterfallmeldung ausgebildet, so daß man damit bei Bedarf die einzelnen Kreise spannungsfrei schalten kann. Die ankommenden und abgehenden Kabel gehen im Schrank auf Lötstreifenverbinder, die je nach Kabelverlegung oben oder unten angeordnet sein können (Bild 8).

Neue Meßstellenumschalter

Eine bestimmte Anzahl von Meßinstrumenten für die Anzeige von Betriebsmeßgrößen, wie z.B. Rauchgas- und Frischlufttemperatur, HD-Dampfdrücke und -temperaturen, dient zum Aufschalten einer ganzen Reihe von Meßstellen, die im und am Kessel verteilt sind. Die Meßstellenumschalter der üblichen Bauart passen in das erheblich verkleinerte Format der übrigen Steuerpult-Bauteile nicht mehr hinein. Deshalb wurde eine entsprechend kleinere Ausführung geschaffen. Die dabei ebenfalls wesentlich verkleinerte Frontplatte des Schalters, die für Beschriftung verfügbar ist, sollte nicht noch zusätzlich für den Drehgriff, der wegen der Griffbarkeit nicht im gleichen Maße verkleinert werden darf,

beschränkt werden. Deshalb wurde ein Antrieb von unten oder von der Seite vorgesehen. Das bringt den Vorteil, daß der vordere Rand des Pultes flach bleibt und nicht mit herausstehenden Drehknöpfen besetzt werden muß.

Meßwertgruppen-Anwahl gibt bessere Information

Für die Meßstellenumschalter wurde neben der bisherigen Art noch eine Lösung gefunden, bei der sich ihre Funktion besser in den übrigen Rahmen einfügt. Von der Überlegung ausgehend, daß die auf einem Meßstellenumschalter zusammengefaßten Meßwerte eine noch bessere Information geben würden, wenn sie nicht nacheinander, sondern gleichzeitig auf eine entsprechende Anzahl von Instrumenten aufgeschaltet werden könnten, wurde eine sogenannte Meßwertgruppen-Anwahl geschaffen. Dazu sind z.B. in der Wandtafel zweimal sechs Meßinstrumente untereinander vorgesehen. Das Steuerpult enthält Felder mit je zwei Tasten und zwei beleuchteten Schriftfeldern. Von diesen Tasten aus können be-

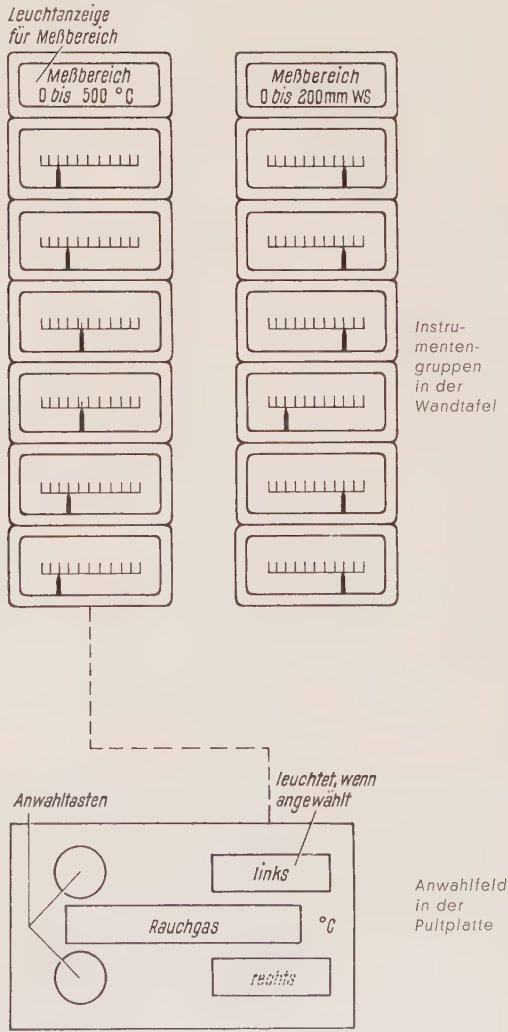


Bild 9 Instrumente und Anwahltasten für die Meßwertgruppen-Anwahl



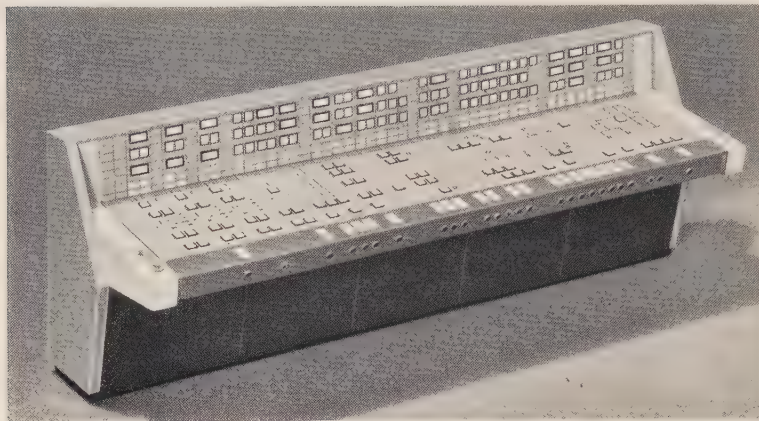


Bild 10 Modell eines in Kleinwartentechnik ausgeführten Steuerpultes für ein 120-MW-Blockkraftwerk

stimmte Meßwertgruppen angewählt werden. Eine solche Darstellung von Meßwertgruppen hat den Vorteil, daß die Gesamtzahl der Meßinstrumente kleiner wird und doch der Wert der Information steigt. Man hat nun z.B. die Rauchgastemperaturen der verschiedenen Meßstellen gleichzeitig untereinander auf Profilinstrumenten zur Verfügung und kann an der Stellung der Zeiger mit einem Blick den gesamten Temperaturverlauf erfassen (Bild 9).

### Von der kleinen bis zur größten Anlage ein System

Das vorliegende Bausteinsystem gibt erstmals die Möglichkeit, von der kleinen Anlage bis zur großen und umfangreichen Steuerung für Blockkraftwerke ein einheitliches System einzusetzen (Bilder 10 und 11).

Erweiterungen können in beliebigem Umfang vorgenommen werden, wobei der Anschluß an die bestehende Anlage keine Schwierigkeiten bereitet. Die Unterteilung in kleine Baueinheiten macht es auch möglich, stets die wirtschaftlichste Lösung bei größter Anpassung an die gegebenen Verhältnisse zu bieten. Soweit spätere Erweiterungen bereits zu übersehen sind, wird die eingeplane Platzreserve mit Leerfeldern besetzt, die später

einfach gegen aktive Bausteine ausgetauscht werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, das Pult für einen weiteren Ausbau nachträglich um 10, 15, 20 usw. senkrechte Reihen ohne Störung des übrigen Betriebes zu verlängern.

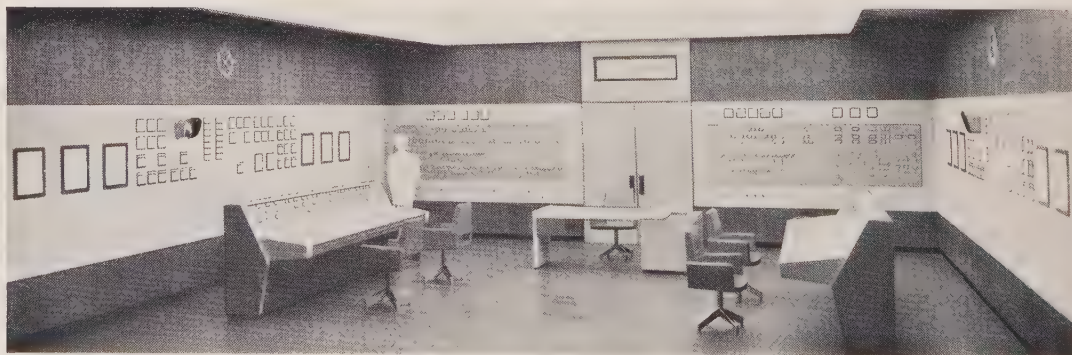
Das beschriebene Steuersystem ist nicht nur für neue Anlagen beliebigen Umfangs anwendbar, es bietet sich auch bei der Modernisierung und Zentralisierung von älteren Anlagen an. Auch Regler älterer Bauart können ohne weiteres verwendet werden. Das System macht es auch leicht, in einem zusätzlichen Anlagenbild eine Übersicht über den Betriebszustand der Gesamtanlage zu schaffen.

In Anlehnung an mehrere im Bau befindliche Anlagen wird in den Bildern 12 und 13 der Ausschnitt eines Pultes für die Feuerführung eines Blockkessels in Anwahl- und kombinierter Technik gezeigt. Aus beiden Bildern ist anschaulich die übersichtliche Gruppenbildung innerhalb der Anlage zu ersehen; es sind hier die Mühlengruppen und der Rauchgas-Luftweg. Auch der Gedanke, beim Hinweisbild möglichst nur mit senkrechten Linien und nur wenigen Symbolen zu arbeiten, macht die Darstellung übersichtlicher.

Bei der kombinierten Technik werden alle Regler direkt gesteuert, und damit sind Stellungsanzeige und Regelabweichung jedes Reglers ständig sichtbar. Nur die weniger wichtigen Stellglieder, z.B. die Rauchgasklappe und die Sollwerte der Regler, werden angewählt gesteuert. Zur eindeutigen Zuordnung werden die Druckknöpfe der Anwahlfelder farbig gekennzeichnet.

Der Entwurf des gleichen Steuerpultes in reiner Anwahltechnik wurde so aufgebaut, daß von den fünf Reglern einer Mühle der wichtigste, z.B. der Kohleregler, mit seinem Anteilsteller ständig aufgeschaltet bleibt. Zusammen mit dem Feuerraum-Druckregler stehen damit dem Bedienenden für die Feuerführung die wichtigsten

Bild 11 Modell einer z. Z. für ein großes Elektrizitätsversorgungsunternehmen im Bau befindlichen Warte mit dem in Bild 10 gezeigten Pult



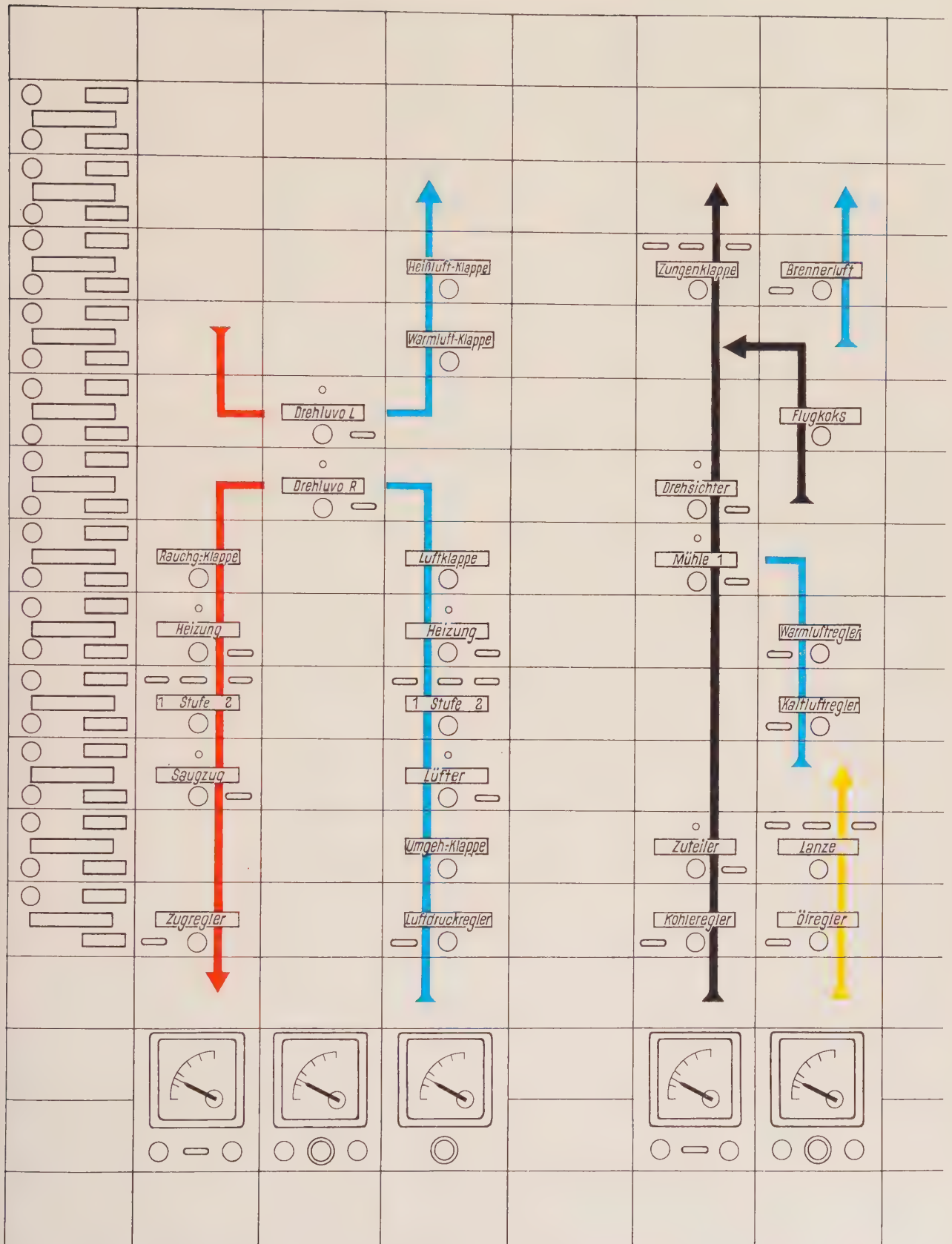


Bild 12 Pultausschnitt mit Tisch und Instrumentenfeldern für reine Anwahltechnik



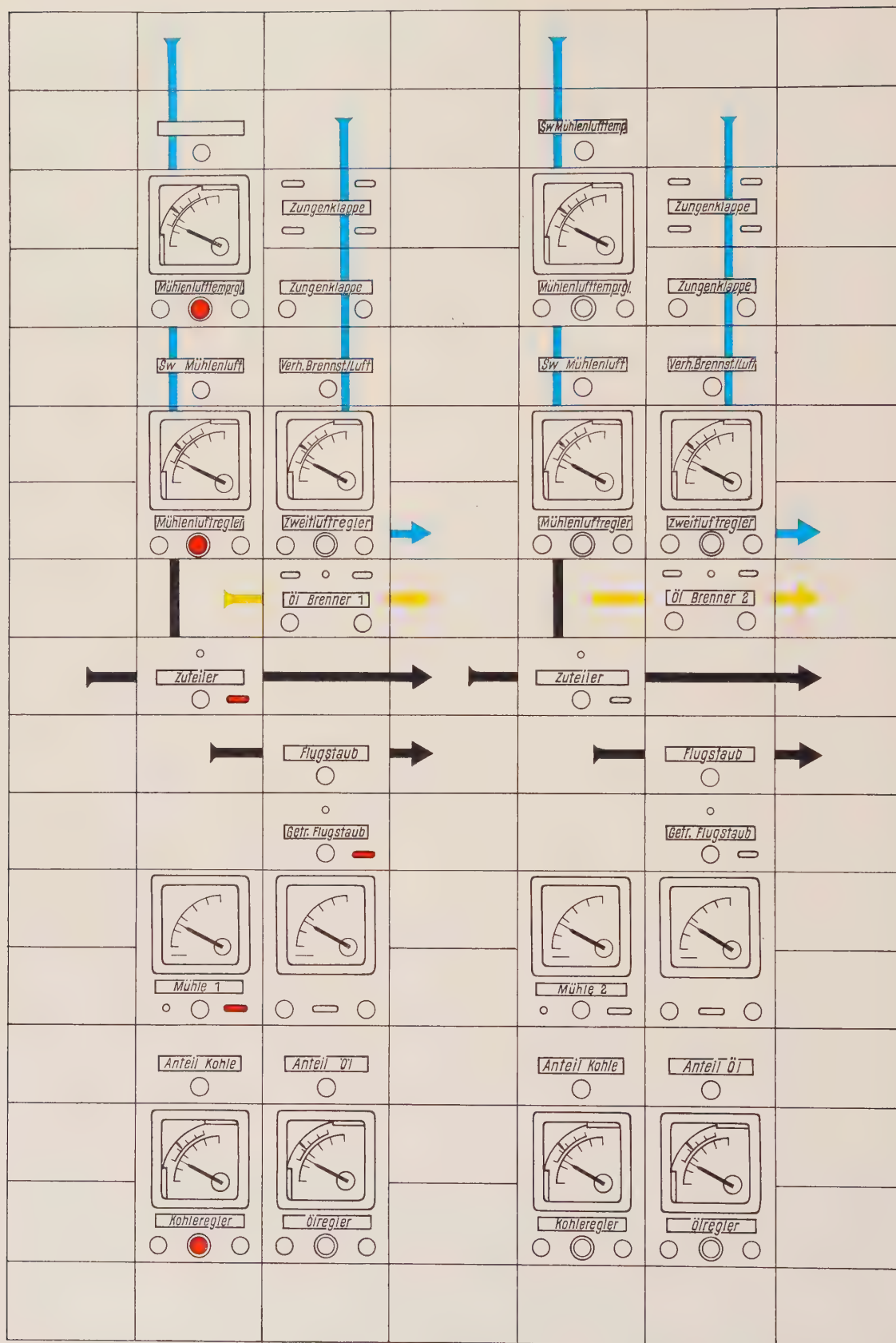


Bild 13 Pultausschnitt mit Tisch und Instrumentenfeldern in Zusammenstellung für kombinierte Technik

Regler ständig zur Verfügung. Der Schaltzustand aller übrigen Regler wird auf den Anwahlfeldern durch Lampen gekennzeichnet, so daß auch hier ein ständiger Überblick gegeben ist. Jeder Regler kann außerdem nach Anwahl gesteuert oder beobachtet werden.

Die beiden Entwürfe sind als Beispiele für die Steuermöglichkeiten des neuen Systems gedacht. Für den jeweiligen Betriebsfall kann der Einsatz der Direktsteuerung oder der Anwahlsteuerung auch in beliebiger Mischung den individuellen Erfordernissen angepaßt werden.

## Entwicklungsstand großer Drehstromantriebe für die chemische Industrie

VON GERHARD BAHR, GERHARD HÜBNER UND ERWIN WALTENBERGER

Der ständig steigende Bedarf der chemischen Industrie an großen Antrieben hat immer mehr zu elektrischen Antrieben geführt, wobei zugleich immer größere Leistungseinheiten gefordert werden. Die elektrischen Antriebsmotoren werden als schnell- oder langsamlaufende Synchron- oder Asynchronmotoren ausgeführt. Zweipolige Asynchronmotoren können z. Z. bis zu Leistungen von etwa 10 MW, vierpolige Asynchron- und Synchronmotoren bis etwa 20 MW gebaut werden. Die größten ausgeführten Motoren zum Antrieb von Kolbenverdichtern sind 4200-kW-Synchron- und Asynchronmotoren mit 125 U/min sowie 6200-kW-Synchronmotoren mit 94 U/min. Die Grenzleistungen liegen in diesen Fällen weit höher als die benötigten und technisch ausführbaren Leistungen der Kolbenverdichter.

Wichtige Fragen bei der Bemessung der Motoren sind: Anlauf, Netzschnittung, Wicklungsisolation, Bauformen, Kühlung und Belüftung. Besondere Bemühungen gelten seit einiger Zeit der Geräuschminderung. Hier wird auf diese Punkte im einzelnen eingegangen, wobei besonders Neuentwicklungen berücksichtigt sind.

### Anlauf

Aufgrund der ständig zunehmenden Netzleistungen können immer größere Motoren direkt eingeschaltet werden. Es ist das einfachste und häufigste Anlaßverfahren, erfordert nur einen Leistungsschalter und ergibt unter allen Anlaßverfahren die kleinste Anlaufwärme. Beim direkten Einschalten großer Asynchron- und Synchronmotoren beträgt der Anlaufstrom – je nach Leistung und Drehzahl des Motors – das 3,5- bis 5,5fache des Nennstromes, der Leistungsfaktor des Anlaufstromes ist etwa 0,25. Nur wenn es die Netzverhältnisse nicht zulassen, wird ein mittelbares Anlaßverfahren gewählt. Tafel 1 zeigt die grundsätzliche Anordnung der bisher ausgeführten Schaltungen.

Zu erwähnen ist ein von den Siemens-Schuckertwerken entwickeltes abgewandeltes Teilwicklungsverfahren, bei

dem schon während des Anlaufs der zweite Wicklungs-  
zweig zu einem Teil des ersten parallel geschaltet ist. Dadurch werden die bei Asynchronmotoren u. U. störenden Oberwellenmomente so stark vermindert, daß ein einwandfreier Hochlauf des Antriebes gewährleistet ist.

Beim Stern-Dreieck-Anlauf bereiten die beim Umschalten auftretenden Stromspitzen Schwierigkeiten. Sie können vermieden werden, wenn durch Überbrückungswiderstände ohne Feldunterbrechung umgeschaltet wird.

Bild 1 zeigt die Anlaufkennlinien eines ausgeführten vierpoligen 6300-kW-Asynchronmotors für direktes Einschalten, der zum Antrieb eines Gebläses dient. Obwohl das

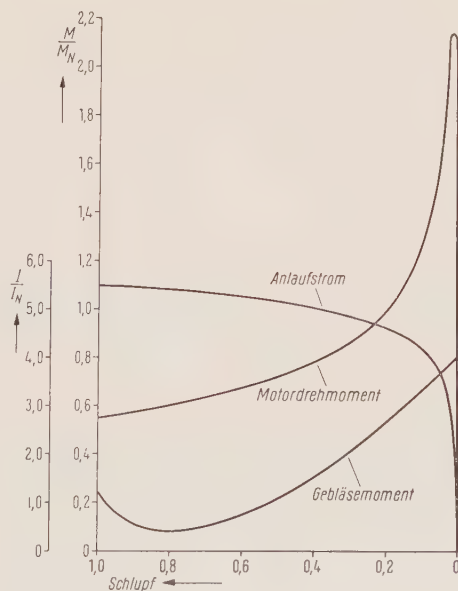


Bild 1 Anlaufkennlinien eines vierpoligen 6300-kW-Asynchronmotors zum Antrieb eines Gebläses (direktes Einschalten)



Direktes Schalten	Drossel im Sternpunkt	mit Blocktransformator	Teilspannungsanlauf 3-Schalter-Verfahren	Teilwicklungsanlauf	Abgewandelter Teilwicklungsanlauf (für Asynchronmotoren)	Stern-Dreieck-Anlauf ohne Feldunterbrechung
$I_A = I_1 = \frac{U_1}{X_K}$	$\frac{I_A}{I_1} = \frac{X_K}{X_K + X_D}$	$\frac{I_A}{I_1} = \frac{X_K}{X_K + X_T}$	$\frac{I_A}{I_1} = \left( \frac{U_A}{U_1} \right)^2$	$\frac{I_A}{I_1} = 0,6 \text{ bis } 0,7$	$\frac{I_A}{I_1} = 0,6 \text{ bis } 0,7$	$\frac{I_A}{I_1} = 1$
$M_A = M_1 = 100\%$	$\frac{M_A}{M_1} = \left( \frac{I_A}{I_1} \right)^2$	$\frac{M_A}{M_1} = \left( \frac{I_A}{I_1} \right)^2$	$\frac{M_A}{M_1} = \left( \frac{I_A}{I_1} \right)^2$	$M_A = 40 \text{ bis } 45\%$	$\frac{M_A}{M_1} \approx 60\%$	$\frac{M_A}{M_1} = 1$
S <sub>1</sub> ein	S <sub>1</sub> ein S <sub>2</sub> ein	S <sub>1</sub> ein	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> ein S <sub>2</sub> aus, S <sub>3</sub> ein	S <sub>1</sub> ein S <sub>2</sub> ein	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> ein S <sub>2</sub> aus, S <sub>3</sub> ein	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> ein S <sub>3</sub> ein S <sub>2</sub> aus S <sub>4</sub> ein
1 Leistungsschalter 3 Wicklungsenden	2 Leistungsschalter 1 Drossel 6 Wicklungsenden	1 Leistungsschalter (1 Transformator) 3 Wicklungsenden	3 Leistungsschalter 1 Spartransformator 3 Wicklungsenden	2 Leistungsschalter 6 Wicklungsenden	3 Leistungsschalter 9 Wicklungsenden	4 Leistungsschalter 1 Ohmscher Widerstand 6 Wicklungsenden

Tafel 1 Anlaufschaltungen für große Asynchron- und Synchronmotoren. Grundsätzliche Anordnung der Schaltungen, Verminderung des Anlaufstromes und Anlaufmomentes gegenüber direktem Einschalten, erforderliche Schaltoperationen und Aufwand an Schaltern und Anlaßgeräten

Gebläsemoment hier auf den verhältnismäßig hohen Wert von 80% des Motor-Nennmomentes steigt, ist während des ganzen Anlaufvorganges das kleinste Beschleunigungsmoment zu Beginn des Anlaufs vorhanden.

Das Motordrehmoment zeigt den für Hochstabläufer bezeichnenden spitzen Verlauf in der Nähe des Kipp-schlupfes. Man hat bei Asynchronmotoren nur für ein entsprechendes Anzugsmoment zu sorgen, damit das Reibungsmoment der Ruhe mit Sicherheit überwunden wird; der weitere Momentenverlauf der Arbeitsmaschine ist für den Asynchronmotor meistens von untergeordneter Bedeutung. Das Anzugsmoment läßt sich unabhängig von der Form der Läuferstäbe nur auf Kosten der anderen Betriebseigenschaften – Anlaufstrom, Wirkungsgrad oder Leistungsfaktor – erhöhen, denn die Käfigwicklung führt, im Gegensatz zum Synchronmotor, auch während des Betriebes den zur Drehmomentbildung erforderlichen Läuferstrom.

Das Verhältnis Anzugsmoment zu Nennmoment hängt auch von der Größe des Motors ab, wobei mit steigender Leistung je Polpaar die Anzugsmomente immer kleiner werden.

Bild 2 zeigt die Anlaufkennlinien eines ausgeführten vierpoligen 8700-kW-Synchronmotors für Anlauf mit 55% Teilspannung. Der Motor treibt über ein Getriebe einen Turbokompressor an. Die Drehmomentkurve verläuft hier wesentlich flacher als beim Asynchronmotor, und das Anzugsmoment ist im allgemeinen höher. Die Anlaufwicklung braucht nur den Erfordernissen des Anlaufs angepaßt zu werden und beeinflusst nicht die Betriebseigenschaften des Motors, da sie bei Betrieb keinen zur Drehmomentbildung erforderlichen Strom führt. Man hat eine gewisse Freizügigkeit hinsichtlich der Größe und Lage des Maximalmomentes.

Im Gegensatz zum Asynchronmotor hat bei dem Synchronmotor der Momentenverlauf der Arbeitsmaschine

in der Nähe der synchronen Drehzahl einen gewissen Einfluß auf die Bemessung der Anlaufwicklung. Der Motor muß in der Nähe der synchronen Drehzahl noch ein genügend hohes asynchrones Drehmoment entwickeln, damit er möglichst nahe mit seiner Arbeitsmaschine an die synchrone Drehzahl herankommt, um ein sicheres Eintrittgehen beim Zuschalten der Erregung zu gewährleisten.

### Verhalten der Motoren bei Netzsicherungen

Wichtige elektrische Antriebe, die bei einer Störung der Energiezufuhr einen Betriebsausfall mit schwerwiegenden Folgen verursachen, erhalten zwei Speisemöglichkeiten. So wird bei Kesselspeisepumpenmotoren stets das Umschalten auf ein zweites Netz vorgesehen. Um eine kurze Unterbrechungszeit zu erzielen, schaltet man den Motor schon bei 40% Restspannung auf das zweite Netz.

Beim Abschalten eines Asynchronmotors klingt das von der Läuferwicklung umfaßte Motorfeld nach einer Exponentialfunktion ab, die durch die magnetische Leerlaufzeitkonstante  $T_0$  des Motors bestimmt ist. Das abklingende Feld induziert im Ständer eine Restspannung.

Ihre Größe und Phasenlage ändert sich, da das Restfeld kleiner wird, der Motor im Zeitpunkt des Abschaltens einen Schlupf  $s_0$  hat und während der Umschaltzeit – bedingt durch das Lastmoment – die Drehzahl abfallen muß.

Bild 3 zeigt rechts den Verlauf der Restspannung in Abhängigkeit von der Zeit und links in einem Polardigramm ihre Größe und Winkellage gegenüber dem Netzspannungszeiger für einen Antrieb mit einer Anlaufzeitkonstante von  $T_A = 5$  s, einer magnetischen Leerlaufzeitkonstante des Motors von  $T_0 = 1$  s und einem Schlupf von  $s_0 = 0,5\%$ . Soll bei 40% Restspannung umgeschaltet werden, so muß die Umschaltzeit nach dem Zeitdiagramm mindestens 0,8 s betragen (Langzeitumschaltung). Sind beide Netze synchron (Frequenz und Phasenlage), so kann – wie das Polardigramm zeigt – unter Einhaltung der 40%-Restspannungsbedingung auch innerhalb einer Zeit von 0,2 s umgeschaltet werden (Schnellumschaltung).

Beim Umschalten auf das zweite Netz fließt ein rasch abklingender Strom, der je nach Phasenlage der Restspannung bis zu 50% größer sein kann als der Anlaufstrom und der deshalb auch höhere mechanische Beanspruchungen der Wickelköpfe zur Folge hat. Die Wickelköpfe müssen sehr sorgfältig und kräftig versteift sein. Bild 4 zeigt den Wickelkopf eines zweipoligen 2650-kW-Asynchronmotors. Zwei von Winkelstützen getragene Ringe, die mit den Wickelköpfen verschnürt sind, verhindern das radiale Ausknicken der Wickelköpfe. In mehreren Reihen längs des Umfanges eingeschnürte Distanzblöcke

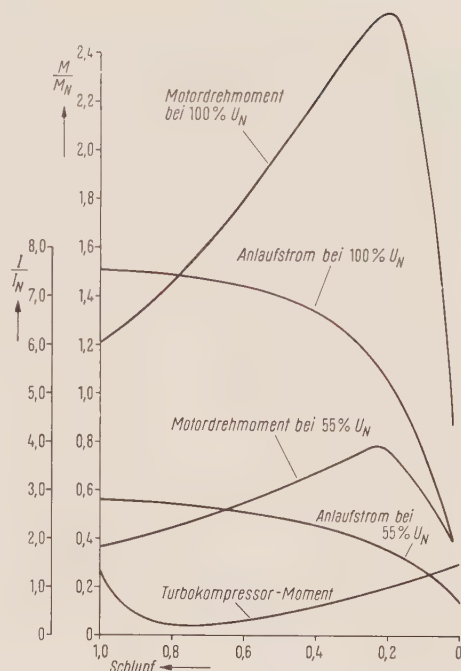


Bild 2 Anlaufkennlinien eines vierpoligen 8700-kW-Synchronmotors zum Antrieb eines Turbokompressors (Anlauf mit 55% Teilspannung)

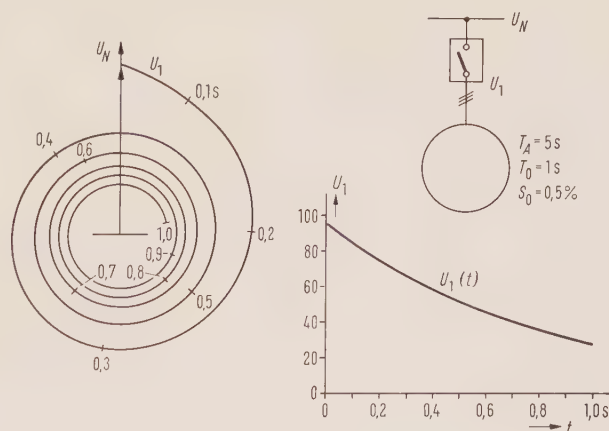


Bild 3 Netzsicherung bei Asynchronmotoren. Verlauf der Restspannung in Abhängigkeit von der Unterbrechungszeit und Phasenlage gegenüber der Netzspannung

stützen die Spulenseiten gegeneinander ab, und die Hül senenden werden durch eingetriebene Keilstücke gegen seitliches Abknicken gesichert.

Meistens wird eine Gruppe von Motoren mit verschiedenartigen Arbeitsmaschinen gemeinsam umgeschaltet [1]. Während der Unterbrechungszeit arbeiten die größeren Motoren der Gruppe als Generatoren, und ihr Restfeld bricht rascher zusammen. Die erforderlichen Unterbrechungszeiten werden an einem Netzmodell



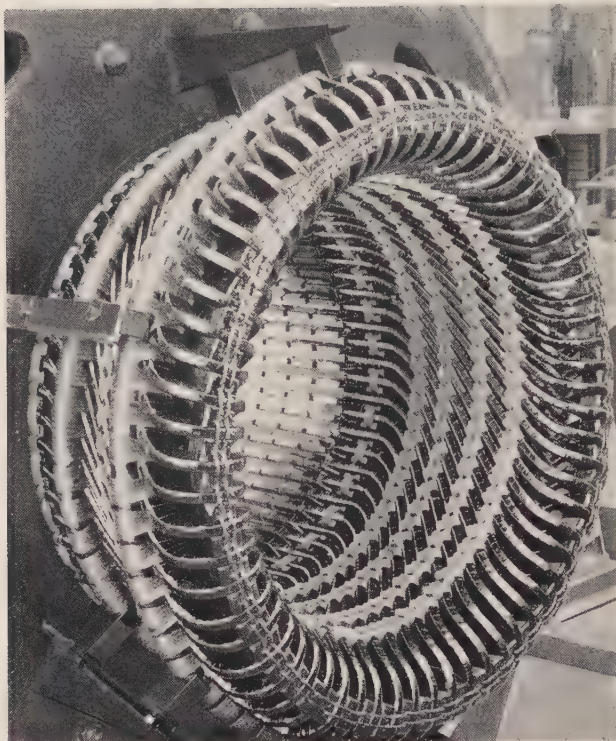


Bild 4 Wickelkopfversteifung eines zweipoligen  
 2650-kW-Asynchronmotors zum Antrieb einer Kesselspeisepumpe  
 (Umschaltung bei 40% Restspannung)

vorausberechnet und bei der erstmaligen Inbetriebsetzung für die endgültige Einstellung der Relais überprüft.

Beim Synchronmotor, der üblicherweise nicht für ein Zuschalten mit Restspannung ausgeführt wird, ist zu berücksichtigen, daß beim Abschalten die Spannung an den Ständerklemmen ohne Eingriff in die Erregung ansteigt. Dadurch und durch das Vorhandensein eines Polradwinkels (20 bis 30°) ist eine Schnellumschaltung unter Berücksichtigung der Phasenlage in den meisten Fällen nicht durchführbar.

Für eine Langzeitumschaltung ist zu beachten, daß trotz der heute üblichen Schnellentregungseinrichtungen zur vollständigen Entregung immer noch Zeiten in der Größenordnung von 1 s erforderlich sind. Eine Langzeitumschaltung wird daher in vielen Fällen fraglich (asynchrones Moment größer als Lastmoment), und der Synchronmotor muß neu angefahren werden.

### Wicklungsisololation

Die Isolierung der Hochspannungswicklungen wurde früher überwiegend nach Klasse A ausgeführt. Als es gelang, eine für die Leiterisolierung geeignete Glasseide mit verhältnismäßig kleinem Isolationsauftrag herzustellen, wurde immer mehr die Isolierung nach Klasse B

bevorzugt; sie wird heute in den meisten Fällen ausgeführt.

Vielfach wird gefordert, daß trotz Isolierung nach Klasse B die Grenz-Übertemperaturen nach Klasse A nicht überschritten werden. Man erhält dadurch sowohl eine gewisse thermische Reserve für etwaige Überlastungen und Änderungen der Kühlluftzufuhr (z. B. bei der Kühlerreinigung) als auch eine Verlängerung der thermischen Lebensdauer der Isolation. Die Ständerwicklung ist meistens eine Zweischicht-Spulenwicklung; nur bei sehr großen Leistungen oder bei Niederspannung kann man eine Stabwicklung ausführen. Die Spulen sind im Vakuum asphaltiert, ihre Nutseiten erhalten eine Umprägung aus breitbahnigem Mikafolium, und der Wickelkopf wird mit Lackglasgewebefolien isoliert.

Diese Art der Isolation hat sich sehr gut bewährt und wird auch für die heute üblichen Spannungen bis 12,5 kV verwendet. Bei noch höheren Spannungen wird mitunter die MICALASTIC\*-Isolation benutzt, bei der die Isolierung der Spule aus durchgehend in Nut und Wickelkopf aufgetragenen Glimmerbändern besteht.

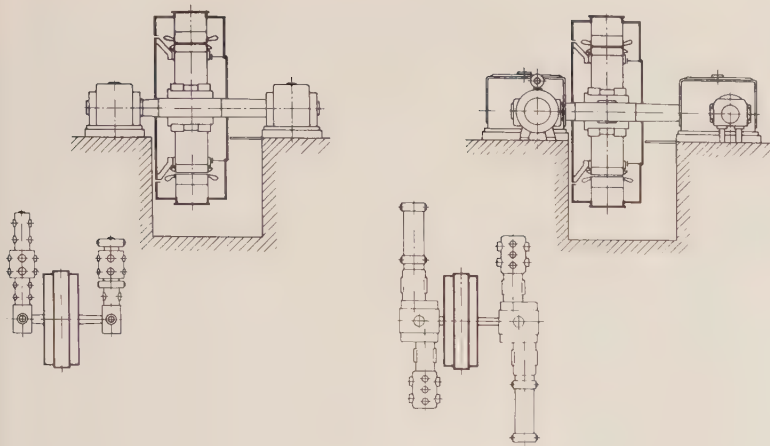
### Bauformen

Bedingt durch neuentwickelte Kompressorbauarten wurde auch die Bauform des Antriebsmotors den veränderten räumlichen Verhältnissen angepaßt. Die klassische Bauform des langsamlaufenden Kolbenverdichterantriebes ist der sogenannte Sattelmotor in Bauform A3, der einen liegenden Kompressor antreibt (Bild 5a). Mehr und mehr hat sich jedoch in den letzten Jahren der Boxerkompressor auch in Deutschland durchgesetzt. Durch die gegenüberliegende Anordnung der Zylinder läßt sich ein günstigerer Massenausgleich erzielen, der den Ungleichförmigkeitsgrad verbessert, das erforderliche Schwungmoment des Aggregates vermindert und die Bodenschwingungen auf ein Mindestmaß herabsetzt. Bild 5b zeigt einen Sattelmotor mit Boxerkompressor.

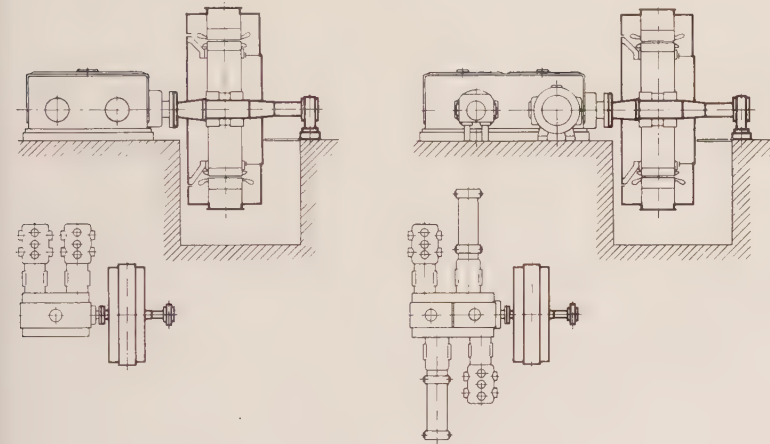
Falls das Triebwerk der Kompressoren in einem Block zusammengefaßt ist (liegend mehrkurbelig, Boxeranordnung oder stehend mehrkurbelig), werden bei starrer Flanschkupplung die Bauformen D2 oder D3 verwendet und bei elastischer Kupplung die Bauform D5. In beiden Fällen hat der Motor eine eigene Welle, im ersten Fall mit einem Stützlager, im zweiten Fall mit zwei eigenen Lagern.

Die Form D2 (D3) hat den Vorteil der geringeren Baulänge. Die kleinere erforderliche Grundfläche wirkt sich in geringeren Gebäudekosten aus (Bild 5c und d). Wenn bei starrer Kupplung Drehresonanz besteht, kann das Schwingungssystem mit einer elastischen Kupplung in geeigneter Weise verstimmt werden. In einem solchen Fall ist die Bauform D5 zu verwenden (Bild 5e und f).

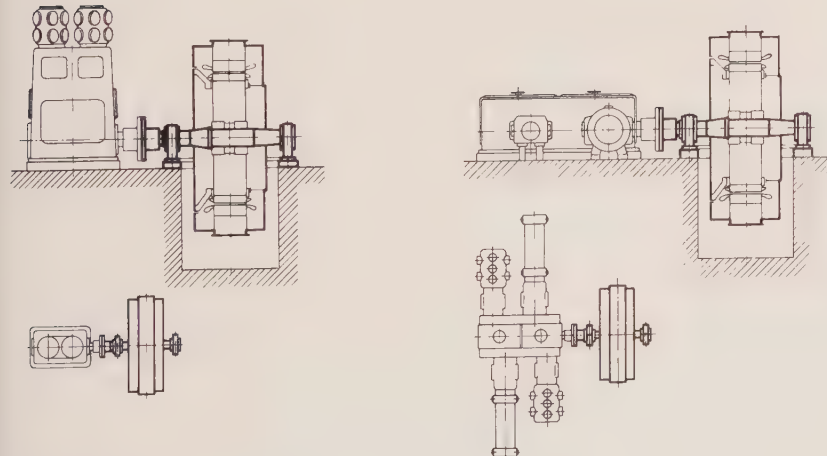
\* Eingetragenes Warenzeichen



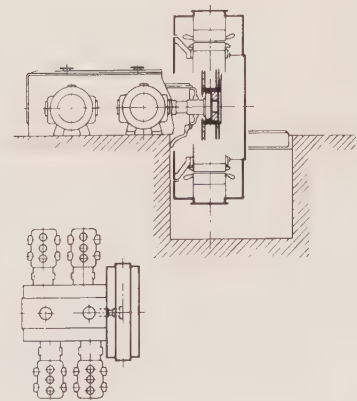
a Bauform A 3 (Sattelmotor) mit liegend zweikurbeligem Kompressor (Triebwerke getrennt)  
b Bauform A 3 (Sattelmotor) mit Boxerkompressor (Triebwerke getrennt)



c Bauform D 3 mit liegend zweikurbeligem Kompressor  
d Bauform D 3 mit Boxerkompressor



e Bauform D 5 mit stehend zweikurbeligem Kompressor  
f Bauform D 5 mit Boxerkompressor



g Bauform A 3 (Läufer fliegend) mit Boxerkompressor

Als Sonderbauform sei noch der Antriebsmotor mit fliegend am Kompressor angeflanschem Läufer erwähnt. Die Vorzüge des Boxerkompressors – günstiger Massenausgleich, kleineres erforderliches Schwungmoment und damit geringeres Läufergewicht – ermöglichen diese elegante und raumsparende Lösung (Bild 5g). Ein verstärktes Kompressorlager zur Aufnahme des Läufergewichtes ist dafür Voraussetzung [3].

Zum Durchspülen des Kompressors mit inertem Gas vor dem Anfahren, zum etwa erforderlichen Einstellen der Kompressorventile oder um die Kurbelkrüpfung der Welle in eine bestimmte Lage zu bringen, muß der auf der Kompressorwelle sitzende Motor langsam durchgedreht werden können. Für diesen Zweck haben die Siemens-Schuckertwerke für mittlere und große Motoren Durchdrehantriebe entwickelt, die gegenüber früheren Ausführungen sehr wenig Platz benötigen. Zum Antrieb dient ein kleiner Drehstrombremsmotor, der an ein Cyclogetriebe angeflanscht ist. Die abtreibende Welle des Cyclogetriebes trägt das Ritzel, das in die Schwungradverzahnung eingeschoben werden kann. Der vorgesehene Tippbetrieb beim Bremsmotor ermöglicht sehr genaues Einstellen der Verzahnungen von Ritzel und Schwungrad zueinander vor dem Einschieben des Ritzels (Bild 6).

Bild 5 Bauformen von Antriebsmotoren für Kolbenverdichter



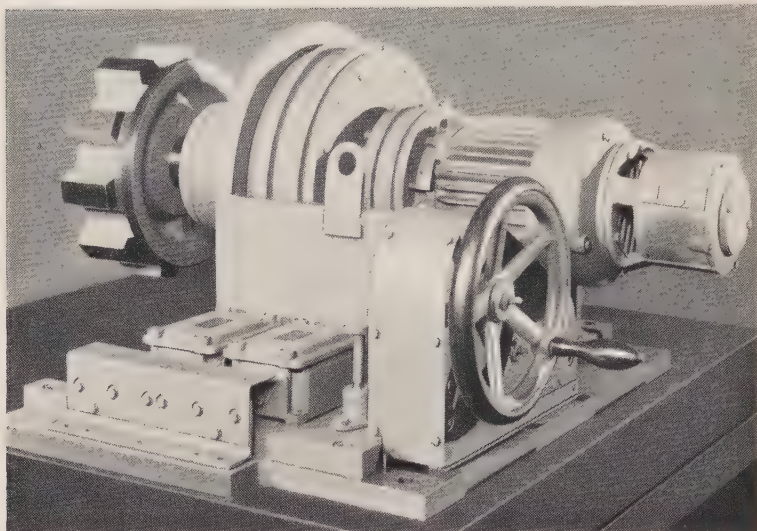


Bild 6 Durchdrehantrieb mit Bremsmotor und Cyklogetriebe für einen Kompressormotor

Zum Antrieb der Kreiselpumpen zur Förderung des Kesselspeisewassers in Kraftwerken werden schnellaufende Käfigläufermotoren bevorzugt. Die Bauform ist allgemein D 5, für kleinere Leistungen und Sonderausführungen auch B 3. Die Motoren sind mit der Pumpe meistens durch eine geschmierte Zahnkupplung verbunden (Bild 7a). Da diese Kupplungen normalerweise axial nicht festgelegt sind, ist ein Federdrucklager im Motor zu empfehlen. Das Federdrucklager führt den Läufer elastisch und gibt, ohne daß am Bund große Kräfte auftreten, axialen Bewegungen, z. B. durch Längenänderung der Welle infolge Temperaturzunahme, in ausreichenden Grenzen nach.

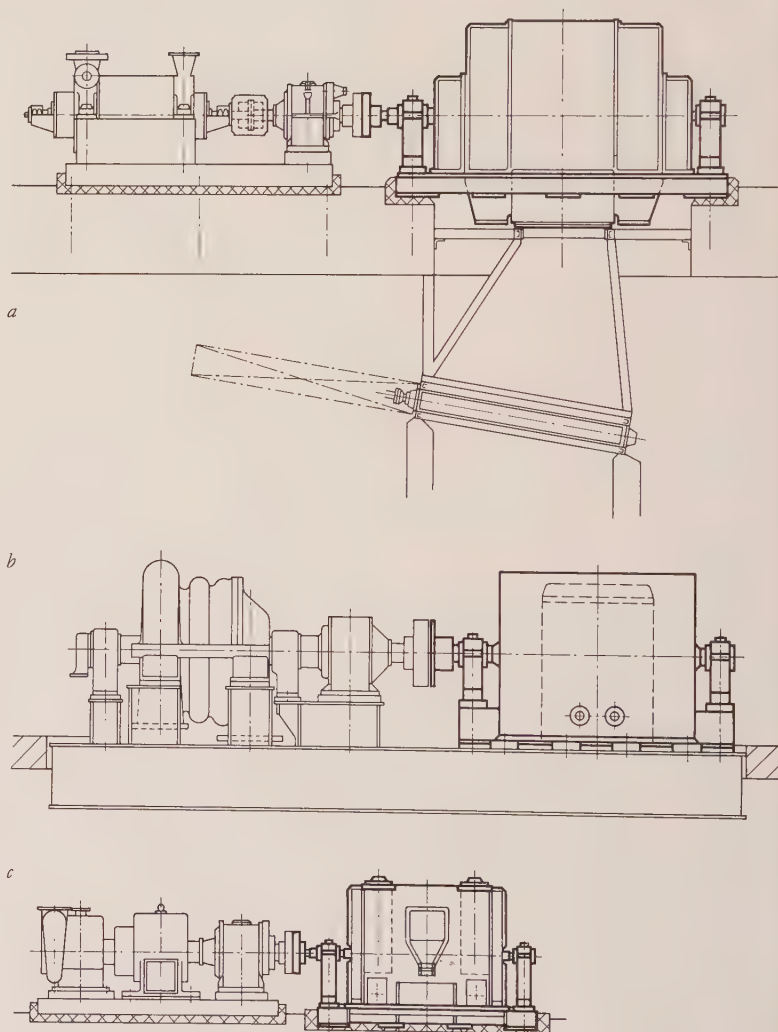
Turbo-Verdichter und Turbo-Gebläse arbeiten meistens mit Drehzahlen über 3000 U/min. Zum Antrieb dienen vierpolige Motoren unter Zwischenschaltung eines Getriebes.

Die Motoren werden hier ebenfalls, mindestens für die größeren Leistungen, in der Bauform D 5 gebaut und über Zahnkupplungen zur Arbeitsmaschine oder zum dazwischenliegenden Getriebe verbunden (Bild 7b und 7c).

#### Schutzart, Belüftung und Kühleranordnung

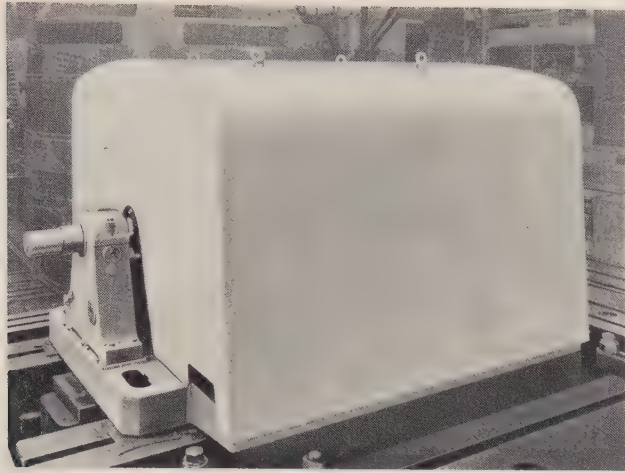
Die Entwicklung beim Bau elektrischer Antriebe führte in den letzten Jahren

eindeutig zu geschlossenen Motoren. Besonders die chemische Industrie hat in dieser Beziehung sehr wesentliche Impulse gegeben. Dem geschlossenen Drehstrommotor (P 33/P 33r) mit unter Flur und neuerdings auch über Flur liegendem Ringlaufkühler wurde in letzter Zeit der Vorzug gegeben. Vorteile der geschlossenen Ausführung sind die Unabhängigkeit von Raum- und Umgebungstemperaturen und vor allem die Tatsache, daß die Maschinen aufgrund ihres geschlossenen Kühlkreislaufes in ihrem Innern praktisch nicht mehr verschmutzen können. Dadurch wird in vielen chemischen Betrieben – vor allem bei durchlaufendem Betrieb – die

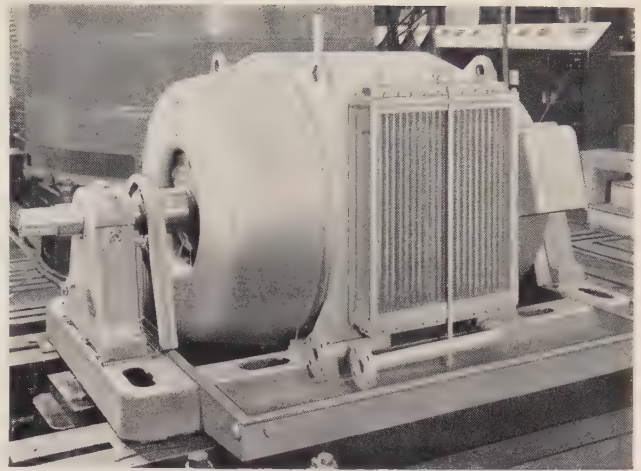


a Bauform D 5, Kühler unten    b Bauform D 5, Kühler seitlich    c Bauform D 5, Vierkühlertyp

Bild 7 Bauform der Schnellläufer



mit Haube



ohne Haube

Bild 8 Zweipoliger Käfigläufermotor, 2500 kW, mit eingebauten Kühlern und körperschallisoliert aufgestellter Haube zum Antrieb einer Kesselspeisepumpe

Betriebssicherheit der Motoren weiter erhöht [4]. Als Standardausführung war bis vor wenigen Jahren der ganzgekapselte Drehstrommotor in Schutzart P 33r mit untenliegendem Kühler anzusehen (s. Bild 7a).

Die untenliegenden Kühler erfordern in jedem Fall ein tiefes und meistens kostspieliges Fundament und sind zum Reinigen und Austauschen einzelner Elemente schlecht zugänglich. Eine Maschine mit Kühlern, die im Fundament eingebaut sind, ist an ihren Platz gebunden und kann nicht ohne erheblichen Aufwand umgesetzt werden. Diese Mängel führten zur Entwicklung von Motoren mit Kühlern über Flur.

### Schnellaufende Drehstrommotoren

Die Siemens-Schuckertwerke haben in den letzten Jahren eine Motorbauart mit seitlich eingebauten Kühlern entwickelt, die sogenannte Haubenmaschine (Bild 8).

Die Kühler werden rechts und links seitlich unmittelbar am Gehäuserücken – also im Abluftstrom – befestigt. Der Aufbau des Gehäuses ist sehr einfach. Zwei Seitenwände tragen das Blechpaket, gegeneinander abgestützt durch am Umfang verteilte Tragrohre. Hinzu kommt ein oberes und ein unteres Mantelblech.

Über die Wickelköpfe wird eine zweiteilige Polyesterabdeckung gesetzt (im Bild zu erkennen), die einmal Wicklungsschutz ist und gleichzeitig die Luftführung (Bild 9a) für die auf beiden Seiten angeordneten Axiallüfter übernimmt. Diese Schilde aus glasfaserverstärktem Polyester sind sehr leicht und können bequem von Hand abgenommen werden, ohne daß die Wicklung beschädigt werden kann. Die guten elektrischen Isolier-

eigenschaften des Polyestermaterials ermöglichen eine Verkürzung der Maschinenbaulänge, da mit den Schilden dichter an die Wicklung herangegangen werden kann. Über die gesamte Maschine wird eine einteilige Blechhaube gestülpt, die den Luftumlauf innerhalb der Maschine bei Ringlaufkühlung gewährleistet. Besonders zu erwähnen ist, daß die Haube ringsherum weder angeschraubt noch angeklemt ist. Sie liegt auf Zellkautschukstreifen auf, allseitig durch Gummipuffer begrenzt. Irgendeine mechanische Verbindung mit den übrigen Maschinenteilen besteht nicht. Dadurch ist die Haube weitgehend gegen Körperschall isoliert, wodurch eine erhebliche Geräuschminderung bewirkt wird. Die Haube kann ohne jegliche Montagearbeit – gegebenfalls während des Betriebes – mit dem Kran abgehoben werden.

Falls diese ringlaufgekühlten Motoren in schmutzigen Betrieben eingesetzt sind und die Haube nicht abgenommen werden kann, wird die Ausführung mit vier Kühlern verwendet (Bild 9b). Bei dieser Ausführung sind die beiden Kühlelemente nochmals unterteilt, so daß an vier Ecken der Maschine je ein Kühlelement in Schubkästen angeordnet ist. Der obere Bündelboden des Kühlers ragt aus dem Maschinengehäuse heraus. Jedes der Elemente kann nach Lösen der Ventile und der entsprechenden Befestigungsschrauben zum Reinigen oder zum Austausch nach oben aus dem Schubkasten herausgezogen werden. Der Vorteil der Schallisolation durch die elastisch aufgestellte Haube ist bei dieser Ausführung allerdings nicht gegeben.

### Langsamlaufende Drehstrommotoren

Bei langsamlaufenden Motoren sind der Ringlaufkühlung durch Eigenbelüftung gewisse Grenzen gesetzt. Die



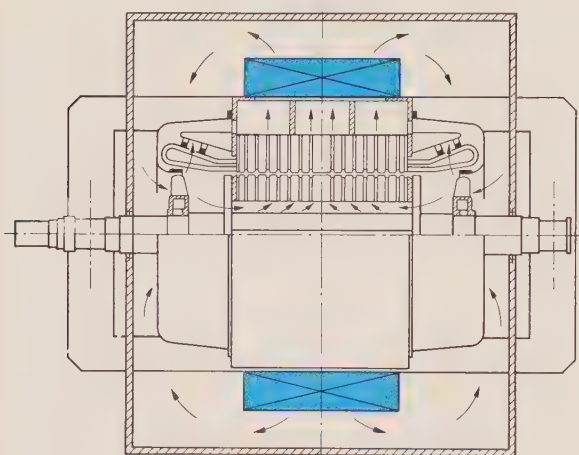
Umfangsgeschwindigkeit des Läufers und damit die Luftgeschwindigkeit und Druckerzeugung innerhalb der Maschine sind – gemessen an zwei- und vierpoligen Maschinen – gering. Beim langsamlaufenden Motor muß der luftseitige Kühlerwiderstand meistens auf 5 mm WS vermindert werden, um noch eine einwandfreie Belüftung zu erzielen. Dieser Druckabfall im Kühler wird durch den Einbau eines Axiallüfters mit großem Durchmesser und großer Schaufelzahl kompensiert.

Die langsamlaufenden Motoren haben im allgemeinen einen großen Durchmesser und eine geringe Breite. Das Anbringen der Kühler am Gehäuserücken wie bei den Schnellläufern ist deshalb nicht möglich. Bedingt durch die Sonderbauart der Kompressorantriebsmotoren mit Seitenschwungrad ist nur eine Seitenwand des Gehäuses zum Anbau der Kühler geeignet; die Motoren müssen also von einer Seite her belüftet werden. Der Kühler wird in zwei Elemente unterteilt und jeweils rechts und links an der Stirnwand des Gehäuses, meistens in Schubkästen nach oben ausziehbar, angebracht. Darüber wird eine

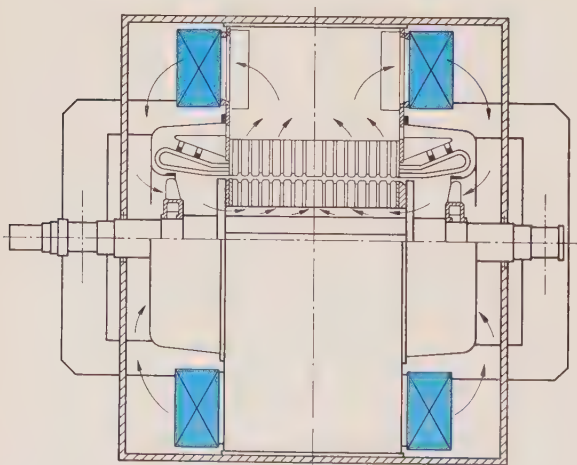
mehrteilige Lufthose gesetzt, die es ermöglicht, nach Abnehmen einzelner Teile die Kühler zu reinigen oder auszuwechseln. Die Konstruktion ist so ausgebildet, daß beim Abschalten eines Kühlelementes der Betrieb mit voller Leistung aufrechterhalten werden kann. Der Motor nimmt während dieser Zeit die benötigte Kühlluft als Frischluft aus dem Raum auf und bläst die erwärmte Luft in entgegengesetzter Richtung aus einer geöffneten Klappe am Ständerrücken wieder aus (Bilder 9c und 10).

#### Wettergeschützte Motoren für Freiluftaufstellung

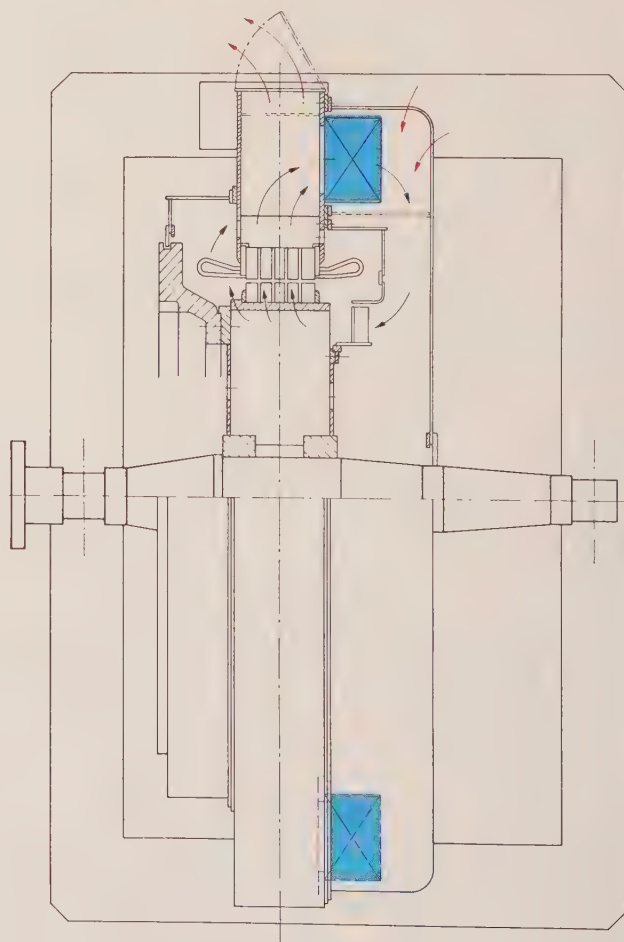
In den letzten Jahren war deutlich die Tendenz zu erkennen, Motoren für Spezialzwecke (Pumpen, Zwischenverdichtern usw.) im Freien aufzustellen. Die Siemens-Schuckertwerke bauten schnelllaufende Kompressorantriebsmotoren in der Sonderschutzart »wettergeschützt«. Diese in Europa bisher wenig bekannte Bauart kann zwischen den spritzwassergeschützten Maschinen (P 22) und den völlig gekapselten Maschinen (P 32) eingeord-



a Haubenmaschine; Schnellläufer



b Vierkühlertyp; Schnellläufer



c Reinigungsbetrieb; Langsamläufer

Bild 9 Belüftung, Kühleranordnung

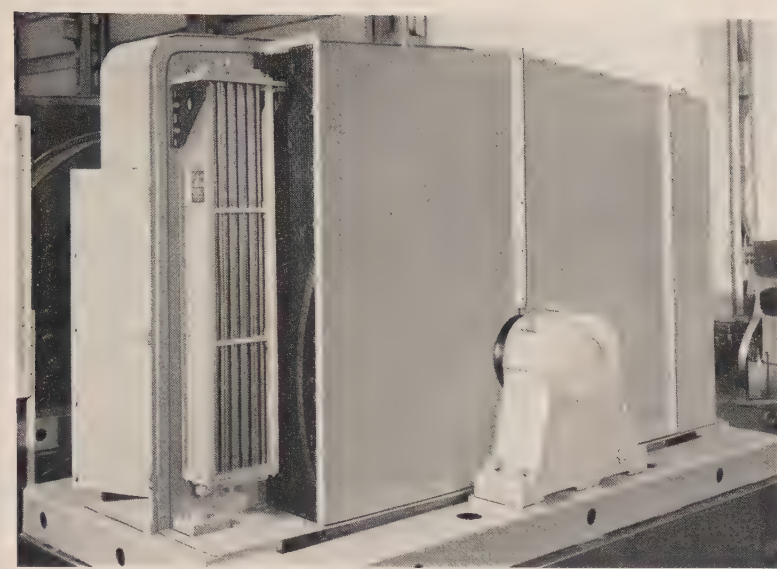


Bild 10 Langsamlaufender Asynchronmotor, 770 kW, mit seitlich eingebauten Kühlern zum Antrieb eines Kolbenverdichters. Der Lufthosenteil wurde zum Reinigen des Kühlers während des Betriebes abgenommen. Bauform D5, Schutzart P 33

net werden. Wie die Bezeichnung »wettergeschützt« andeutet, sind die Maschinen für Freiluftaufstellung vorgesehen und gegen Witterungseinflüsse, wie Regen, Schnee, Wind, Sand usw., geschützt. Um das Eindringen von Wasser auch bei Wind zu verhindern, werden die seitlichen Lufteintrittsöffnungen mit winkelförmig abgebogenen Jalousien verkleidet, die den Luftstrom umlenken und etwa eingedungenen Regen nach unten abtropfen lassen (Bild 11). Nach Passieren der obenliegenden Filter sammelt sich die gereinigte Luft in einem in Achsrichtung liegenden großen Kanal, wird von den beiden Axiallüftern angesaugt und durch die Maschine gedrückt.

Bei einseitig starkem Winddruck, z. B. während eines Sturmes, werden der vom Wind mitgeführte Staub und der Regen zum größten Teil durch den »Vorraum« der Maschine geblasen, ohne die Filter zu passieren.

### Geräusche

In letzter Zeit werden zur Beurteilung elektrischer Maschinen nicht nur die elektrischen und mechanischen Eigenschaften herangezogen, sondern zunehmend auch ihr Geräuschverhalten. Diese Entwicklung war voraussehen, so daß bei der langen Tradition des Hauses Siemens auf dem Gebiet der Geräuschforschung [5, 6] bereits vor mehreren Jahren mit der systematischen Geräuschbekämpfung an den Maschinen begonnen wurde [7 bis 16].

Bei größeren elektrischen Maschinen sind die aerodynamisch und magnetisch verursachten Geräusche die wichtigsten Quellen des Maschinenlärms. Lager- und Bürstengeräusche treten demgegenüber meistens zurück.

Bei schnellaufenden Maschinen mit Umfangsgeschwindigkeiten über  $50 \text{ ms}^{-1}$  genügt es im allgemeinen, den aerodynamischen Anteil zu untersuchen. Bei Langsamläuferten wird dagegen der magnetisch erregte Anteil maßgebend. Durch diese Beschränkung auf das Wesentliche wird es möglich, für das aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzte Gesamtgeräusch verhältnismäßig einfache Beziehungen anzugeben.

### Geräusche der schnellaufenden Maschinen

Schnelläufer sind fast immer lauter als Langsamläufer. Das hierfür maßgebliche aerodynamische Geräusch besteht aus einem Rauschen, dem in einigen Fällen zusätzlich Sirenentöne überlagert sind. Während es heute fast immer möglich ist, die Sirenentöne so weit zu mindern, daß sie neben dem Rauschen nicht mehr wahrgenommen werden [12], ist das Rauschen bei einer Rotation der Maschine in Luft oder einem anderen Gas

grundsätzlich unvermeidbar. Es ist die Folge von statischen Wirbel-Ablösungen an den bewegten Konstruktionsteilen. Die Energie seines Geräuschspektrums ist über den gesamten Frequenzbereich des Ohres verteilt.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die bei der Entstehung des Rauschens maßgebend sind, wurden in den vergangenen Jahren näher untersucht [8, 9, 10, 11].

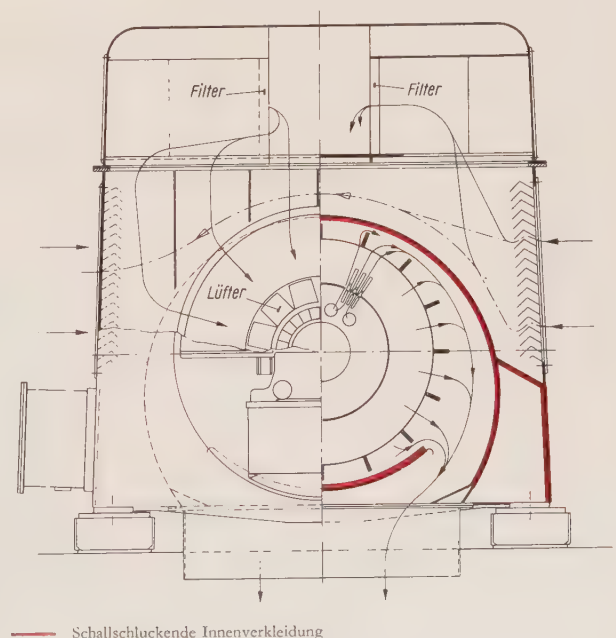
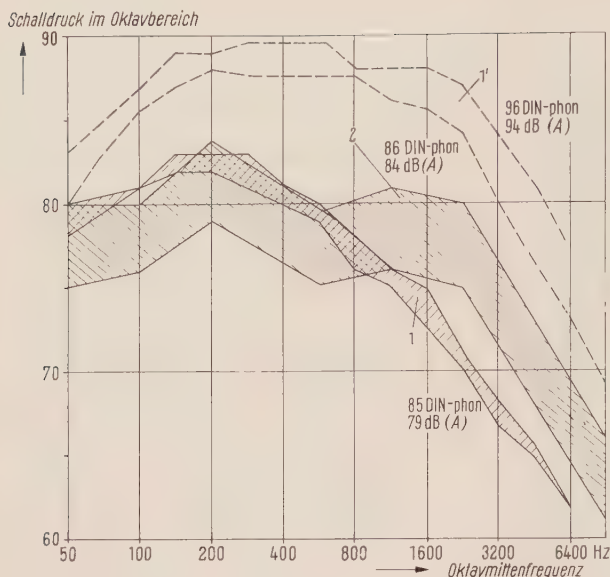


Bild 11 Vierpoliger Asynchronmotor, 4200 kW, in wettergeschützter Ausführung mit schallschluckender Innenverkleidung





1 Zweipoliger Asynchronmotor, 320 kW, mit Absorptionsdämpfer in den Ansaug- und Ausblasöffnungen  
1' Motor wie bei 1, aber ohne Absorptionsdämpfer  
2 Vierpoliger Asynchronmotor, 4200 kW, mit schallschluckender Innenverkleidung nach Bild 11  
Der gestrichelte Bereich der Kurven umschließt alle in einem Meter Abstand von der Maschinenoberfläche in Achshöhe gemessenen Oktavpegeldiagramme

Bild 12 Oktavpegeldiagramme der Geräusche durchzugbelüfteter Maschinen mit schallabsorbierenden Auskleidungen

Bei nichtgekapselten, im Durchzug belüfteten Maschinen dringt dieser aerodynamische Geräuschanteil fast unvermindert nach außen. Durch schallschluckende Anordnungen im Inneren elektrischer Maschinen ist es aber heute möglich, schnelllaufende, große Maschinen, die ihre Kühlluft unmittelbar mit dem Aufstellungsraum austauschen (in offener Bauart), ohne Geräuschbelastigung der Umgebung zu betreiben. Hierfür wurde bei den Siemens-Schuckertwerken u. a. eine den Erfordernissen des Elektromaschinenbaues genügende Anordnung von Absorptionsschichten entwickelt. Diese bestehen aus Steinwolleplatten, die zur Erzielung einer guten Absorptionswirkung spezifisch leicht und faserig sind, und einer Halterung, die dafür sorgt, daß vorbeistreichende Kühlluft und Vibrationen das faserige Material nicht ablösen. Damit ausgerüstete Maschinen sind schon seit einigen Jahren an zahl-

reichen Stellen des In- und Auslandes mit bestem Erfolg in Betrieb (s. [12, 13]).

Eine vierpolige Maschine erzeugt z. B. trotz ihrer Umfangsgeschwindigkeit von  $56 \text{ ms}^{-1}$  und einer Leistung von 4200 kW bei Durchzugbelüftung nur eine Lautstärke\* von 86 DIN-phon, wobei der Schalldruckpegel im Oktavpegeldiagramm den für das Ohr wünschenswerten monotonen Abfall mit zunehmender Frequenz hat (Bild 12). Das schallabsorbierende Material wurde dabei zwischen Blechpaket und Gehäusemantel derart angebracht (s. Bild 11), daß die Abluft durch einen bedämpften Ringkanal abströmt.

Bei der kleineren, offenen zweipoligen Maschine mit der Leistung von 320 kW und der Umfangsgeschwindigkeit von  $55 \text{ ms}^{-1}$  läge die »normale« Lautstärke über 95 DIN-phon. Im Inneren der Maschine war hier wenig Raum für eine absorbierende Auskleidung. Sie wurde deshalb an den Ansaug- und Ausblasöffnungen angebracht (Bild 13). Die Maschinenlautstärke wurde dadurch auf 85 DIN-phon gemindert. Für den guten Hör-eindruck war dabei auch maßgeblich, daß die Schalldruckverteilung im Oktavpegeldiagramm mit zunehmender Frequenz monoton abfällt (s. Bild 12).

Werden noch geringere Lautstärken gewünscht, so sind die Maschinen zu kapseln. Die Kapsel, zugleich Maschinenoberfläche, ist bei umluftgekühlten Motoren, bei denen keine besonderen Maßnahmen zur Geräuschminderung getroffen sind, mit der eigentlichen Maschine durch Schweißnähte oder Schrauben körperschalleitend verbunden. Das Geräusch einer vollständig gekapselten Maschine ist nun aber die Summe aller von der Kapsel abgestrahlten Schwingungen. Diese Schwingungen werden in dieser Ausführung nicht allein durch das von innen

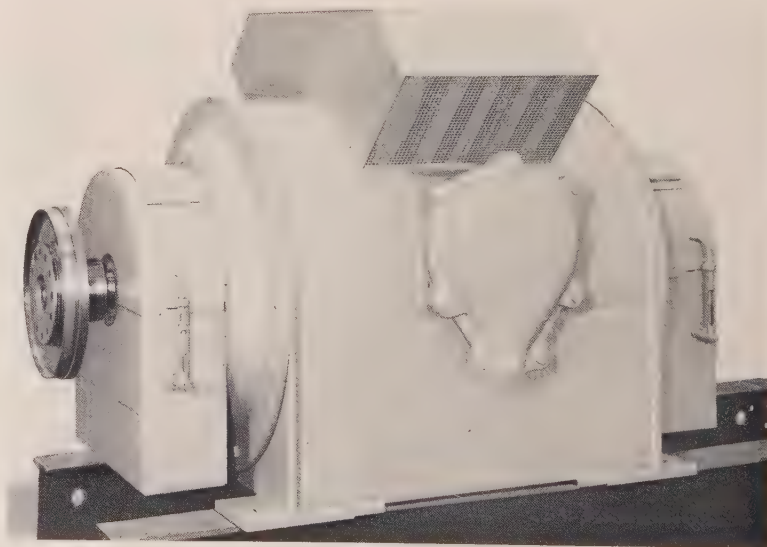
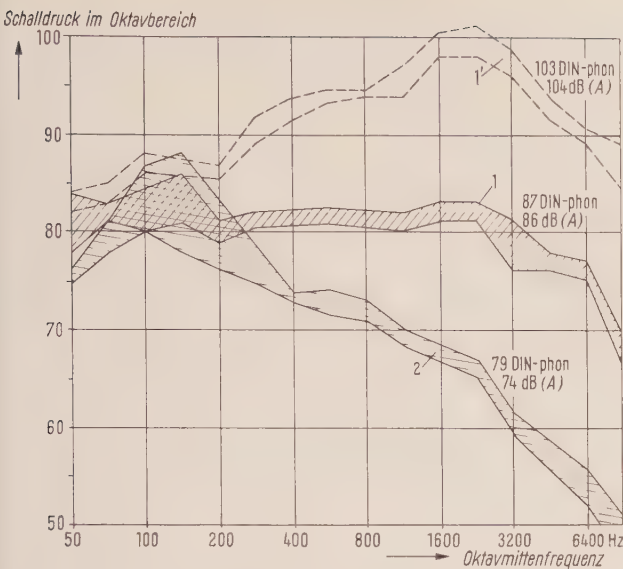


Bild 13 Zweipoliger Asynchronmotor, 320 kW, mit Absorptionsdämpfern

\* Die angegebenen Maschinenlautstärken sind nach dem DIN-Entwurf 45632 gemessen, beziehen sich also auf einen Meßabstand von einem Meter von der Maschinenoberfläche in Achshöhe und sind arithmetische Mittelwerte von Meßergebnissen, die an verschiedenen derartigen Punkten um die Maschine herum ermittelt wurden. Der neuesten Entwicklung entsprechend wurden ferner den DIN-phon-Werten auch die zugehörigen dB(A)-Werte an die Seite gestellt (s. Bild 12 und 14). Über Vorteile des dB(A)-Maßstabes bei der Beurteilung des Maschinenlärms gegenüber der DIN-phon-Angabe s. auch [12].



1 Zweipoliger Asynchronmotor, 2500 kW, mit körperschallisierter Blechkapsel  
1' Motor wie bei 1, Haube abgenommen (Motor nach Bild 8)  
2 Vierpoliger Asynchronmotor, 6300 kW, mit körperschallisierter Schallschluckkapsel

Bild 14 Oktavpegeldiagramm der Geräusche gekapselter Maschinen

auffretende aerodynamische Geräusch erzeugt, sondern auch durch die eingeleiteten magnetisch verursachten Schwingungen und die Lagerschwingungen. Hinzu kommt außerdem, daß großflächige Blechwände wie eine Lautsprechermembran wirken und die Schwingungen ideal abstrahlen können. Die von magnetischen Kräften zunächst nur im Blechpaket erzeugten und die von Unwuchtkräften im Lager erregten Schwingungen werden darum durch Körperschallisolierung von der Maschinenkapsel ferngehalten. Nach dieser Maßnahme dient die Kapsel dann wirklich allein der Dämmung der aerodynamischen Geräusche. Sie wirkt aber nicht einfach als Haube, sondern hat vielmehr bestimmte Aufgaben zu übernehmen, wie z. B. die Luftführung, und ist nur ein nach akustischen Gesichtspunkten geänderter organischer Teil der Maschine. Bei den üblichen Maschinengeräuschen bringt eine 4 mm dicke Stahlblechkapsel eine Lärminderung von etwa 15 DIN-phon, vorausgesetzt, daß die Haube gut gegen Körperschall isoliert ist und die Spalten gut abgedichtet sind.

Bei einem zweipoligen Asynchronmotor (s. Bild 8) mit einer Leistung von 2300 kW und einer Umfangsgeschwindigkeit von  $74 \text{ ms}^{-1}$  verringert sich die Lautstärke auf diese Weise auf etwa 87 DIN-phon; das Oktavpegeldiagramm zeigt nicht mehr den für offene Bauformen eigentümlichen Anstieg des Schalldruckpegels bis zu Frequenzen von 2 kHz, sondern einen etwa konstanten Schalldruck, der dann für hohe Frequenzen abfällt (Bild 14). Die Geräuschminderung einer Kapsel kann durch noch dickere Wände erhöht werden, je Verdoppelung der

Wanddicke um etwa 4 dB. Um auf diesem Weg eine Minderung von beispielsweise 30 dB zu erhalten, müßten schon Blechdicken von etwa 60 mm verwendet werden; wegen des Gewichts- und Kostenaufwandes ist dieser Weg also unwirtschaftlich.

Eine weitere Geräuschminderung erreicht man aber sehr wirtschaftlich dadurch, daß die leichte Kapsel innen schallabsorbierend verkleidet wird. Hierdurch kommt der dämmende Effekt der Blechwand, der hauptsächlich von der Trägheit seiner Masse herrührt, fast vollständig zur Wirkung, weil das Reflektionsvermögen der Kapselinnenfläche herabgesetzt wird und nicht mehr – wie bei der unausgekleideten Haube – zu einer Erhöhung des Schalldruckes im Inneren der Maschinen führt. Ferner wird durch diese Auskleidung das Blech gleichzeitig entdröhnt. Eine derartige Ausführung ergibt Geräuschminderungen zwischen 30 und 40 DIN-phon, wobei allerdings auf die Abdichtung kleinster Spalte an der Welle und gegenüber dem Grundrahmen oder Fundament sehr sorgfältig geachtet werden muß. Ein Beispiel für diese technische Lösung ist eine vierpolige Asynchronmaschine, die bei einer Umfangsgeschwindigkeit von  $52 \text{ ms}^{-1}$  und einer Leistung von 6300 kW im Abstand von 1 m eine Maschinenlautstärke von nur 79 DIN-phon (s. Bild 14) erzeugt. Hörbare Töne treten bei diesen Konstruktionen grundsätzlich nicht auf.

#### Geräusche der langsamlaufenden Maschinen

Die geringen Umfangsgeschwindigkeiten von Langsamläufern lassen das magnetisch erzeugte Geräusch neben dem aerodynamisch erzeugten hörbar werden. Dieses »magnetische Geräusch« entsteht als Wechselwirkung zwischen den pulsierenden magnetischen Radialkraftwellen des Luftspaltfeldes und dem Blechpaket bzw. dem Ständergehäuse, das ein mechanisches Schwingungsgebilde ist. Im Gegensatz zum aerodynamischen Rauschen besteht es aus einzelnen Tönen oder Klängen, deren hervortretende Frequenzen bei Drehstrommaschinen die doppelte Netzfrequenz und eine von der Läuferrutenzahl und Drehzahl abhängige Frequenz ist. Treten solche Töne hörbar auf, so sind sie oft die Folge einer Resonanz, bei der die Frequenz der anregenden Kraft und eine Eigenfrequenz des Maschinenständers übereinstimmen. Dann ist der Ton nur bei einer bestimmten Drehzahl und Netzfrequenz vorhanden. Das läßt sich von vornherein vermeiden, indem die Ständer-eigenfrequenzen durch geeignete konstruktive Gestaltung hinreichend weit von den anregenden elektromagnetischen Frequenzen gelegt oder umgekehrt die Nutzfrequenz entsprechend zu den Eigenfrequenzen gewählt wird.

Die Vorausberechnung der Lautstärke des magnetischen Anteils ist nach neuen Erkenntnissen sehr viel schwieriger, als früher angenommen [17], da sowohl der unsymmetrische Aufbau der Maschinengehäuse mit seinen Schraub- und Schweißverbindungen als auch die Auf-



spannung auf dem Fundament berücksichtigt werden muß [6, 14, 15]. Aber auch diesen Schwierigkeiten kann man durch körperschallisolierte Abtrennung der die Maschinenoberfläche bildenden Konstruktionselemente vom primär angeregten Blechpaket oder Maschinengehäuse begegnen. Dies geschieht wieder durch Ausbildung der Maschinenoberfläche zur vollständig getrennten Kapsel oder, bei axial schmalen Gehäusen, durch körperschallisolierte Abtrennung der großflächigen Lufthosen (s. [12], Bilder 6 und 13). Dem gleichen Zweck dient auch eine federnde Aufhängung des Blechpaketes im Gehäuse. Mit derartigen Maßnahmen sind für langsamlaufende elektrische Maschinen im Leistungsbereich einiger 1000 kW Lautstärken unter 70 DIN-phon zu erreichen, die dann sowohl die heute üblichen Geräuschstärken der angetriebenen Maschinen unterschreiten als auch meistens weit unterhalb des heute betriebsüblichen Lärmes liegen.

#### Schrifttum

- [1] Fieguth, H.: Umschaltvorgänge in Kraftwerks-Eigenbedarfs- und Industrieanlagen. Siemens-Zeitschrift **26** (1952) 163 bis 166
- [2] Goeschel, H. und Lampel, E.: Elektrisch angetriebene Kolben-Gasverdichter in chemischen Großanlagen. Siemens-Zeitschrift **18** (1938) 365 bis 380
- [3] Treuheit, J.: Fortschritte bei elektrischen Großantrieben langsamlaufender Kolbenkompressoren. Siemens-Zeitschrift **29** (1955) 175 bis 179
- [4] Müller, E.: Weiterentwicklung elektromotorischer Antriebe für die chemische Industrie. Siemens-Zeitschrift **26** (1952) 166 bis 171
- [5] Lübcke, E. und Plattner, H.: Wege zur Geräuschminderung an elektrischen Maschinen. Siemens-Zeitschrift **15** (1935) 157 bis 164
- Lübcke, E.: Geräuscheinwirkung bei elektrischer Energieumsetzung. Siemens-Zeitschrift **16** (1936) 204 bis 217
- Lübcke, E.: Geräuschbekämpfung für elektrische Maschinen und Geräte. ETZ **59** (1938) 765 bis 770
- Zeller, W. und Lübcke, E.: Lärmbewehr in der Lüftungstechnik. Heizung und Lüftung **11** (1937) 17 bis 25 und 49 bis 55
- Lübcke, E.: Geräuschminderung in Lüftungsanlagen. Gesundheits-Ing. **60** (1937) 577 bis 581
- Lübcke, E.: Schallmessung – Lärminderung. Z. phys. Chem. **51** (1938) 3
- [6] Lübcke, E.: Geräuschforschung im Maschinenbau. VDI-Z. **98** (1956) 791 bis 798
- [7] Hübner, G. und Lübcke, E.: Zur Einwirkung von periodischen, räumlich verteilten Kräften auf die Schwingungen mechanischer Schwingungsgebilde. Z. Naturforsch. **6** (1956) 492 bis 498
- [8] Hübner, G.: Geräuschbildung von Radiallüftern. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 499 bis 505
- [9] Hübner, G.: Über Radiallüfter-Geräusche. Kampf dem Lärm **7** (1960) 42 bis 45
- [10] Hübner, G.: Geräuschbildung an rotierenden Zylindern und Radiallüftern. Kongreßbericht vom 3. ICA, Verlag Elsevier Amsterdam, 1961 (in Vorbereitung)
- [11] Hübner, G.: Aerodynamische Geräusche umlaufender Maschinenteile. VDI-Ber. **28** (1961) (in Vorbereitung)
- [12] Hübner, G.: Geräuschminderung bei großen elektrischen Maschinen. Siemens-Zeitschrift **35** (1961) 111 bis 121
- [13] Haffa, A.: Das Pumpspeicherwerk Happurg. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 310 bis 319
- [14] Hübner, G.: Über das Schwingungsverhalten von Wechselstrommaschinen-Ständern mit Rundschnitt-Blechpaketen. ETZ-A **80** (1959) 33 bis 39
- [15] Hübner, G.: Untersuchungen über Schwingungen von Ständern elektrischer Maschinen. VDI-Ber. **24** (1957) 51 bis 58
- [16] Reiplinger, E.: Geräuschprobleme bei Großtransformatoren. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 69 bis 76
- Reiplinger, E.: Möglichkeiten weiterer Geräuschbekämpfung bei Großtransformatoren. ETZ-A **81** (1961) 102 bis 105
- [17] Jordan, H.: Der geräuscharme Elektromotor. Verlag W. Girardet, Essen, 1950

## Der Antrieb von Kolbenverdichtern mit stromrichter gespeisten Gleichstrommotoren

VON FRANZ WESSELAK

Bei Kolbenverdichtern für bestimmte chemische Fabrikationsprozesse ist die Anpassung der Gasmenge und damit des Druckes an die jeweiligen Betriebsbedingungen aus technischen Gründen nur über die Drehzahl des Verdichters möglich. Für alle derartigen Fälle ist der Antrieb mit fremderregten Gleichstrommotoren besonders geeignet, weil ihre Drehzahl mit Hilfe der Ankerspannung in weitem Bereich verlustlos gesteuert werden kann. Zur Gewinnung der Gleichstromenergie aus dem Drehstromnetz werden gittergesteuerte Quecksilberdampf-Stromrichter verwendet, die gegenüber rotierenden Umformern wesentliche Vorteile aufweisen: Sie gewährleisten hohe Betriebssicherheit, die Anschaffungs- und Betriebskosten liegen niedriger, Gewicht und Raumbedarf sind kleiner, sie haben keine dem Verschleiß unterworfenen Bauteile und durch Wegfall der Fundamente ist man weitgehend frei in der Wahl des Aufstellungsortes. Wegen des geringen Leistungsbedarfes der Gittersteuereinrichtung – etwa 15 mW –, ist der stromrichtergespeiste Gleichstromantrieb vorzüglich für selbsttätige Regelung und automatischen Fabrikationsablauf geeignet. Für Verdichterantriebe bietet die Gitter-

steuerung die Möglichkeit, ohne großen Aufwand Druckregelungen einzurichten. Außerdem ermöglicht sie eine günstige Anpassung an die betrieblichen Erfordernisse bezüglich des Ungleichförmigkeitsgrades der Drehzahl und des Stromes bei möglichst kleinen Schwungmassen. Wichtig ist auch, daß der Antrieb durch einfache Maßnahmen weitgehend unempfindlich gegen Netzspannungsabsenkungen gemacht werden kann.

In den letzten Jahren wurden mehrere Verdichterantriebe mit Stromrichterspeisung ausgeführt, die sich im ununterbrochenen Dauerbetrieb sehr gut bewährt haben.

### Bestimmung der Ungleichförmigkeit der Betriebsgrößen aus dem Tangentialdruck-Diagramm

Die Projektierung des ersten Gleichstromantriebes für Kolbenverdichter war Anlaß, eingehend zu untersuchen, welche Rückwirkung das mit der Drehzahl periodisch schwankende Gegenmoment des Verdichters auf den gesamten Antrieb ausübt. Über das Verhalten von Drehstromantrieben liegen mehrere Veröffentlichungen vor [1, 2], deren Ergebnisse jedoch wegen des ver-

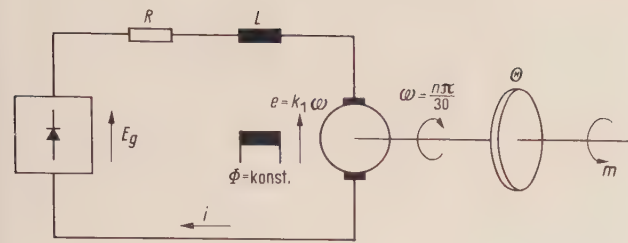


Bild 1 Ersatzschaltung eines stromrichter­gespeisten Gleichstrom­antriebes für Kolbenverdichter

schiedenen elektrischen und dynamischen Verhaltens dieser Maschinen nicht auf den stromrichter­gespeisten Gleichstrommotor übertragen werden können.

Bild 1 zeigt die Ersatzschaltung eines Gleichstromantriebes.  $E_g$  bezeichnet die EMK des Stromrichters bei konstanter Aussteuerung,  $e = k_1 \omega$  ist die Gegen-EMK des Motors,  $i$  der Ankerstrom,  $R$  der Ersatzwiderstand und  $L$  die Ersatzinduktivität des Ankerkreises einschließlich Stromrichter,  $\Theta$  das gesamte mechanische Trägheitsmoment und  $m$  das periodisch um einen Mittelwert  $M_0$  schwankende Lastmoment.

Aus dem Ersatzschaltbild erkennt man sofort, daß ein schwingungsfähiges System mit den beiden Trägheiten  $L$  und  $\Theta$  vorliegt, das durch  $R$  gedämpft ist und dem durch den Verdichter periodische Momentenschwingungen aufgezwungen werden. Der Antrieb wird mit Schwingungen der Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) und des Stromes reagieren, deren Amplituden bei gegebener mittlerer Drehzahl und bestimmtem Verlauf des Verdichtermomentes von  $R$ ,  $L$  und  $\Theta$  abhängen. Aus betrieblichen Gründen dürfen diese Schwankungen nicht zu groß werden, weil sie u. U. zu unerwünschten Erscheinungen führen können, wie Netzspannungsschwankungen (Lichtflimmern), Rüttelkräften an Maschinenteilen, höheren Verlusten und Erwärmung. Häufig werden vom Auftraggeber die maximal zulässigen Werte vorgegeben.

Aus dem Ersatzschaltbild können zwei Gleichungen abgeleitet werden:

Die Spannungsgleichung

$$e = k_1 \omega = E_g - Ri - L \frac{di}{dt} \quad (E_g = \text{konst.})$$

und die Momentengleichung

$$m_e = k_2 i = m + \Theta \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

Die Größen  $\omega$ ,  $i$  und  $m$  können als Summe eines zeitlich konstanten Mittelwertes und einer reinen Wechselgröße ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \Delta\omega \\ i &= I_0 + \Delta i \\ m &= M_0 + \Delta m \end{aligned}$$

Die Gleichungen lauten dann:

$$\begin{aligned} k_1 (\omega_0 + \Delta\omega) &= E_g - R (I_0 + \Delta i) - L \frac{d}{dt} \Delta i \\ k_2 (I_0 + \Delta i) &= M_0 + \Delta m + \Theta \frac{d}{dt} \Delta\omega \end{aligned}$$

In diesen Gleichungen dürfen die konstanten Anteile links und rechts vom Gleichheitszeichen gleichgesetzt werden:

$$\begin{aligned} k_1 \omega_0 &= E_g - R I_0 \\ k_2 I_0 &= M_0 \end{aligned}$$

Nach Kürzen bleiben zwei Gleichungen zwischen den hier allein interessierenden Wechselgrößen

$$k_1 \Delta\omega + R \Delta i + L \frac{d}{dt} \Delta i = 0 \quad (2)$$

$$k_2 \Delta i - \Delta m - \Theta \frac{d}{dt} \Delta\omega = 0 \quad (3)$$

Durch Eliminieren von  $\Delta\omega$  bzw.  $\Delta i$  erhält man, wenn gleichzeitig die Ankerkreiszeitkonstante  $\frac{L}{R} = T_a$  und die mechanische Zeitkonstante  $\frac{R \Theta}{k_1 k_2} = T_m$  gesetzt werden, für den Strom

$$T_a T_m \frac{d^2}{dt^2} \Delta i + T_m \frac{d}{dt} \Delta i + \Delta i = \frac{1}{k_2} \Delta m \quad (4)$$

und für die Winkelgeschwindigkeit

$$\begin{aligned} T_a T_m \frac{d^2}{dt^2} \Delta\omega + T_m \frac{d}{dt} \Delta\omega + \Delta\omega &= \\ &= -\frac{R}{k_1 k_2} (\Delta m + T_a \frac{d}{dt} \Delta m) \end{aligned} \quad (5)$$

Diese Gleichungen wären ohne weiteres lösbar, wenn das Verdichtermoment als periodische Funktion der Zeit gegeben wäre. Die Hersteller von Verdichtern geben das Momentendiagramm jedoch immer nur in Abhängigkeit vom Drehwinkel  $\alpha$  an, das mathematisch als Fourierreihe der Form

$$\Delta m(\alpha) = \sum_1^n \Delta M_p \sin \nu (\alpha - \varepsilon_p)$$

geschrieben werden kann. Mit dem Ansatz

$$\alpha = \int \omega dt = \omega_0 t + \Delta\alpha$$

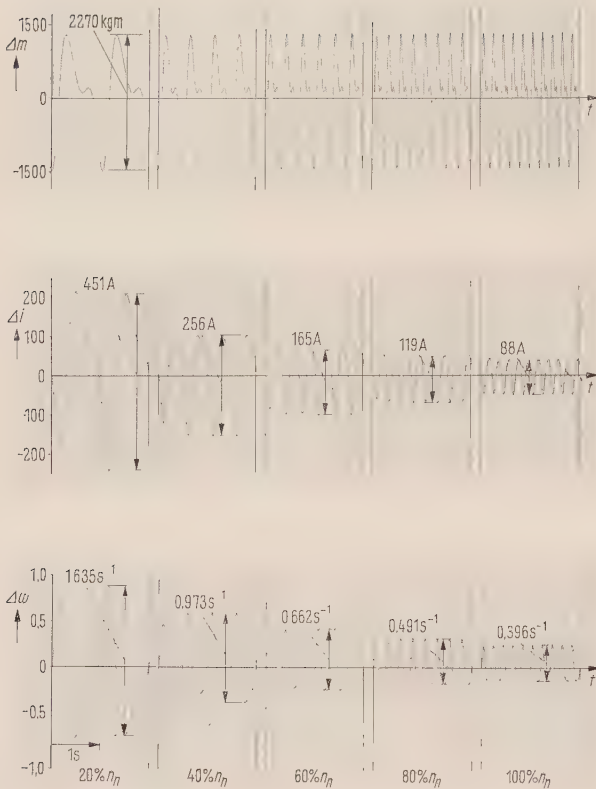
ergibt sich das Drehmoment als Funktion der Zeit

$$\Delta m(t, \Delta\alpha) = \sum_1^n \Delta M_p \sin \nu (\omega_0 t + \Delta\alpha - \varepsilon_p)$$

Diese Gleichung mit  $\Delta\omega = \frac{d}{dt} \Delta\alpha$ , in Gleichung (5) eingesetzt, liefert zwar eine Differentialgleichung für  $\Delta\alpha$  als Funktion der Zeit, die aber nur mit viel Rechenarbeit und auch nur näherungsweise gelöst werden kann.

Eine genaue Bestimmung der Strom- und Drehzahl­schwankungen bei vorgegebenem Momentenverlauf





Gegeben sind:

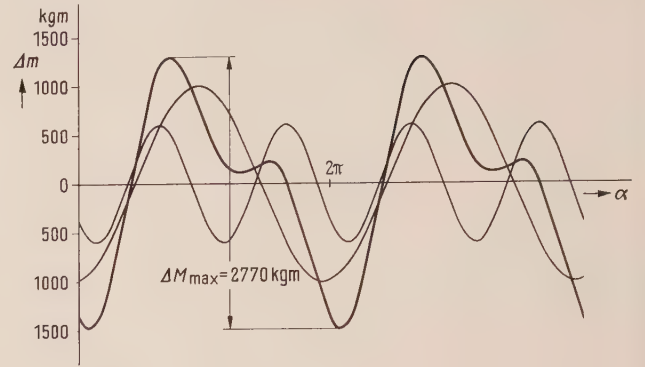
$$\begin{aligned} E_g &= 880 \text{ V} & E_n &= E_g - R I_n = 730 \text{ V} \\ I_n &= 910 \text{ A} & \omega_n &= 15,7 \text{ s}^{-1} \\ R &= 0,165 \Omega & k_1 &= \frac{E_n}{\omega_n} = 46,5 \text{ Vs} \\ L &= 4 \text{ mH} & M_n &= 4325 \text{ kgm} \\ \Theta &= 178 \text{ kgms}^2 & k_2 &= 4,74 \text{ kgm A}^{-1} \\ n_n &= 150 \text{ U/min} & T_a &= \frac{L}{R} = 24,2 \cdot 10^{-3} \text{ s} \\ & & T_m &= \frac{R \Theta}{k_1 k_2} = 133 \cdot 10^{-3} \text{ s} \end{aligned}$$

$$m(\alpha) = 4000 + 1000 \sin 2(\alpha - 40^\circ) - 600 \sin 4(\alpha + 10^\circ) \text{ kgm}$$

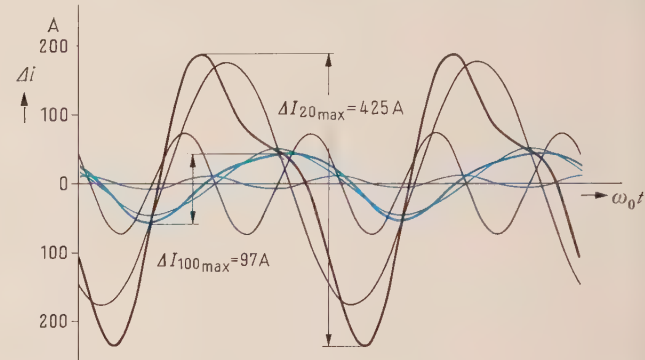
Bild 2 Zeitlicher Verlauf des Lastmoments  $m$ , des Stromes  $i$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  bei einem Kolbenverdichterantrieb mit Gleichstrommotor

Links: Von einem Analogrechner geschriebene Kurven  
Rechts: Nach einem Näherungsverfahren errechnete Kurven

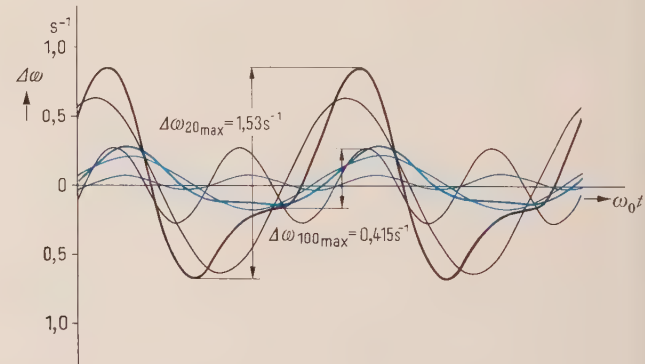
über dem Drehwinkel ist mit Hilfe von Rechenmaschinen möglich. Im Hause Siemens wird dazu ein Analogrechner benutzt, der das gegebene Momentendiagramm lichtelektrisch abtastet und den Verlauf von Strom und Drehzahl direkt in Kurvenform aufzeichnet [3]. Die Aufzeichnungen (Bild 2, links) dieser Rechenmaschine für ein angenommenes Beispiel zeigen deutlich – besonders bei niedrigen Drehzahlen – daß wegen der ungleichförmigen Winkelgeschwindigkeit der Verlauf der Momentenkurve über der Zeit gegenüber dem Verlauf abhängig vom



$$\begin{aligned} M_0 &= 4000 \text{ kgm} \\ \Delta m &= 1000 \sin 2(\omega_0 t - 40^\circ) - 600 \sin 4(\omega_0 t + 10^\circ) \text{ kgm} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} I_0 &= 845 \text{ A} \\ \text{Bei } 20\% n_n \text{ ist } \Delta i_{20} &= 175 \sin 2(\omega_0 t - 61^\circ 50') - 73 \sin 4(\omega_0 t - 8^\circ 20') \text{ A} \\ \text{Bei } 100\% n_n \text{ ist } \Delta i_{100} &= 45 \sin 2(\omega_0 t - 98^\circ 30') - 8,9 \sin 4(\omega_0 t - 26^\circ) \text{ A} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Bei } 20\% n_n \text{ ist } \omega_0 &= 3,14 \text{ s}^{-1} \\ \Delta \omega_{20} &= 0,628 \sin 2(\omega_0 t + 32^\circ 10') - 0,271 \sin 4(\omega_0 t + 40^\circ 50') \text{ s}^{-1} \\ \text{Bei } 100\% n_n \text{ ist } \omega_0 &= 15,7 \text{ s}^{-1} \\ \Delta \omega_{100} &= 0,202 \sin 2(\omega_0 t + 10^\circ) - 0,057 \sin 4(\omega_0 t + 33^\circ) \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Drehwinkel etwas verzerrt wird: Die Flächen oberhalb der Nulllinie sind größer als die unterhalb gelegenen. Das bedeutet, daß der zeitliche Mittelwert des Drehmomentes etwas größer ist als das mittlere Moment aus dem Tangentialdruck-Diagramm.

Für den Planungsingenieur ist es aber wünschenswert, die Ungleichförmigkeit von Strom und Drehzahl in Abhängigkeit der Parameter  $R$ ,  $L$  und  $\Theta$  bei gegebenem Tangentialdruck-Diagramm wenigstens näherungsweise

bestimmen zu können. Das wird in einfacher Weise möglich, wenn die Verzerrung des Zeitdiagramms gegenüber dem Winkeldiagramm vernachlässigt wird. Dann darf für das Verdichtermoment als Funktion der Zeit gesetzt werden:

$$\Delta m(t) = \sum_1^n \Delta M_\nu \sin \nu (\omega_0 t - \varepsilon_\nu) \equiv \Delta m(\alpha)$$

Jetzt lautet Gleichung (4)

$$T_a T_m \frac{d^2}{dt^2} \Delta i + T_m \frac{d}{dt} \Delta i + \Delta i = \frac{1}{k_2} \sum_{v=1}^n \Delta M_v \sin v (\omega_0 t - \varepsilon_v)$$

Ist die rechte Seite dieser Gleichung eine Summe von Sinusschwingungen, so müssen auch die einzelnen Summanden der linken Seite Sinusschwingungen der gleichen Frequenzen sein. Die stationäre Lösung der Gleichung muß daher die Form haben

$$\Delta i = \sum_1^n \Delta I_\nu \sin \nu (\omega_0 t - \varepsilon_\nu - \varphi_\nu)$$

worin die Scheitelwerte  $AI_v$  und die Phasenwinkel  $\varphi_v$  noch zu bestimmen sind. Sinusförmige Größen können, wie in der Wechselstromtechnik üblich, durch Zeiger dargestellt werden. In symbolischer Schreibweise mit

$\frac{d}{dt} = j\omega$  und  $\frac{d^2}{dt^2} = (j\omega)^2 = -\omega^2$  erhält man für den

Zeiger  $\overline{\Delta I}_\nu$  der  $\nu$ -ten Oberschwingung

$$-T_a T_m v^2 \omega_0^2 \overline{\Delta I_v} + j T_m v \omega_0 \overline{\Delta I_v} + \Delta I_v = \frac{1}{k_2} \overline{\Delta M_v} \quad (6)$$

oder

$$\overline{\Delta I_v} = \frac{\overline{\Delta M_v}}{k_2} \frac{1}{(1 - T_a T_m v^2 \omega_0^2) + j T_m v \omega_0}$$

und für den Scheitelwert

$$\Delta I_\nu = \frac{\Delta M_\nu}{k_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - T_a T_m v^2 \omega_0^2)^2 + T_m^2 v^2 \omega_0^2}} \quad (7)$$

Für den Phasenwinkel gilt

$$\tan \nu \varphi = \frac{T_m \nu \omega_0}{1 - T_a T_m \nu^2 \omega_0^2}$$

Nach einer ähnlichen Rechnung findet man für die Schwankung der Winkelgeschwindigkeit

$$\Delta\omega = \sum_1^n \Delta\Omega_\nu \sin\nu (\omega_0 t - \varepsilon_\nu + \psi_\nu)$$

$$\text{mit } \Delta\Omega_\nu = \frac{R}{k_1 k_2} \Delta M_\nu \sqrt{\frac{1 + T_a^2 \nu^2 \omega_0^2}{(1 - T_a T_m \nu^2 \omega_0^2)^2 + T_m^2 \nu^2 \omega_0^2}} \quad (8)$$

und  $\tan \nu\psi = \nu\omega_0 [T_a - T_m (1 + T_a^2 \nu^2 \omega_0^2)]$

Die Scheitelwerte und Phasenwinkel für  $\Delta I_v$  und  $\Delta \Omega_v$  können aber auch mit Hilfe der Gleichungen (6) und (1) graphisch ermittelt werden (Bild 3). Dieses Verfahren ist zur Kontrolle der Rechnung zu empfehlen.

Für die praktische Anwendung genügt es, wenn die ersten zwei, höchstens drei Oberschwingungen berück-

sichtigt werden. In Bild 2b sind nach diesem Näherungsverfahren gefundene Kurven für zwei Drehzahlen des gleichen Beispiels aufgezeichnet. Die Übereinstimmung ist gut.

Zur zweckmäßigen Wahl der Parameter  $R$ ,  $L$  und  $\Theta$  muß noch geklärt werden, wie durch verschiedene Annahmen ihrer Größe die Strom- und Drehzahlschwankungen beeinflusst werden können. Darüber gibt am besten der Frequenzgang von  $\Delta I$  und  $\Delta \Omega$  Aufschluß. Es ist also zu untersuchen, wie bei sinusförmigen Momentschwankungen gleichbleibender Amplitude die Scheitelwerte  $\Delta I$

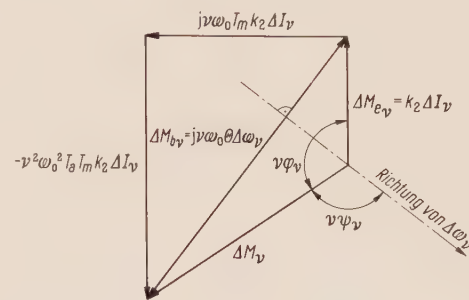
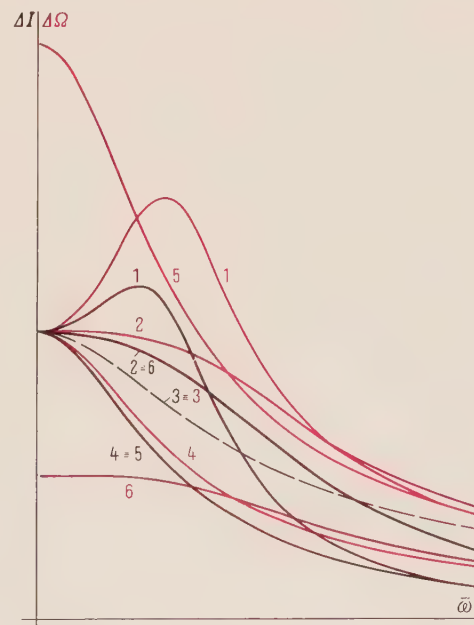


Bild 3 Zeigerdiagramm zur graphischen Ermittlung von  $\Delta I_\nu$ ,  $\Delta \omega_\nu$ ,  $\varphi_\nu$  und  $\psi_\nu$



Kurven	$R$	$L$	$\Theta/k_1k_2$	$I_m$	$T_a$
	$\Omega$	mH	F	ms	ms
1	0,1	5	0,5	50	50
2	0,1	2,07	0,5	50	20,7
3	0,1	0	0,5	50	0
4	0,1	2,07	1,0	100	20,7
5	0,2	4,14	0,5	100	20,7
6	0,05	1,035	1,0	500	20,7

Bild 4 Frequenzgang von  $\Delta I$  und  $\Delta \Omega$



und  $\Delta\Omega$  nach den Gleichungen (7) und (8) als Funktion von  $\nu\omega_0 = \bar{\omega}$  verlaufen.

Für sehr kleine Frequenzen ( $\bar{\omega} \rightarrow 0$ ) ist

$$\lim_{\bar{\omega} \rightarrow 0} \Delta I_{\omega} = \frac{1}{k_2} \Delta M \text{ und } \lim_{\bar{\omega} \rightarrow 0} \Delta \Omega_{\omega} = \frac{R}{k_1 k_2} \Delta M$$

Für hohe Frequenzen – für die höheren Oberschwingungen bei hohen Drehzahlen – gehen mit  $\bar{\omega} \rightarrow \infty$  die Werte  $\Delta I$  und  $\Delta \Omega$  nach Null.

Der Verlauf zwischen diesen Grenzwerten hängt vom Betrag von  $T_m$  und vom Verhältnis  $T_m/T_a$  ab. Je größer die mechanische Zeitkonstante gewählt wird, desto mehr verschieben sich die Frequenzgangkurven in Richtung niedriger Frequenzen. Durch das Verhältnis  $T_m/T_a$  wird die Kurvenform bestimmt.

Bild 4 zeigt einige typische Verläufe. Die Kurven 1, 2 und 3 zeigen Frequenzgänge bei gleichbleibender mechanischer Zeitkonstante, aber verschiedenen Werten  $T_m/T_a$ . Die Kurven 1 haben ausgeprägte Resonanzstellen. Sie treten auf für  $\Delta I$ , wenn  $T_m < 2 T_a$ , und für  $\Delta \Omega$ , wenn  $T_m < (1 + \sqrt{2}) T_a$  ist. Die Dämpfung des Systems ist optimal für  $T_m = 2 T_a$  bzw.  $T_m = 2,41 T_a$ . Der Frequenzgang hat dann den steilsten Abfall nach höheren Frequenzen, ohne daß Resonanzüberhöhungen auftreten (Kurven 2 für  $T_m = 2,41 T_a$ ). Eine weitere Vergrößerung des Verhältnisses  $T_m/T_a$  – bei gleichbleibendem  $T_m$  – verflacht den Frequenzgang. Die Kurve 3 gilt für den Grenzfall  $T_a = 0$ . Eine Vergrößerung der mechanischen Zeitkonstante ist durch  $\Theta$  oder  $R$  möglich. Die Kurven 4 gelten für  $\Theta$  gegenüber den Kurven 2 verdoppelt. Eine Vergrößerung von  $T_m$  durch  $R$  wirkt sich aber ungünstig auf  $\Delta \Omega$  aus, mindestens bei niedrigen Frequenzen. Zu den Kurven 5:  $R$  und  $L$  sind gegenüber den Kurven 2 verdoppelt. Andererseits kann  $\Delta \Omega$  durch Verkleinern von  $R$  verringert werden, wenn man dafür größere Stromschwankungen in Kauf nehmen kann. Zu den Kurven 6:  $R$  und  $L$  sind gegenüber den Kurven 4 halbiert. Durch Verändern von  $R$  gelingt es also,  $\Delta \Omega$  auf Kosten von  $\Delta I$ , oder umgekehrt, zu beeinflussen. Nun ist aber der ohmsche Widerstand des Ankerkreises für einen bestimmten Fall eine durch die Verluste des Stromrichters und des Motors festliegende Größe. Beim stromrichtergespeisten Antrieb bietet die »IR-Kompensation« ein einfaches Mittel, den wirksamen ohmschen Widerstand künstlich zu beeinflussen. Eine dem Ankerstrom proportionale Spannung wird sinngemäß so auf den Eingang des Gittersteuersatzes aufgeschaltet, daß die Ankerspannung mit dem Strom angehoben bzw. abgesenkt wird, je nachdem, ob eine Erhöhung oder Verringerung des wirksamen Widerstandes gewünscht wird.

Wie der optimale Verlauf der Frequenzgangkurven im einzelnen Fall aussehen muß, hängt davon ab, in welchem Drehzahlbereich der Antrieb hauptsächlich arbeiten wird und wie groß die Anteile der einzelnen Oberschwingungen des Drehmomentes sind.

## Gesichtspunkte bei der Ausführung von Gleichstromantrieben mit Stromrichterspeisung

Als Antriebsmotoren werden meistens Langsamläufer verwendet, die unmittelbar mit dem Verdichter gekuppelt sind. Zusätzliche Schwungmassen werden mit Vorteil zwischen dem Motor- und dem Verdichterkupplungsflansch angeordnet. Wegen des großen Drehzahlbereiches müssen die Motoren fremdbelüftet werden. Zweckmäßigerweise wird Kreislaufkühlung über einen Wasserrückkühler vorgesehen. Für den Betrieb in explosionsgefährdeten Räumen werden die Motoren in der Schutzart »Fremdbelüftung (Ex)F« ausgeführt. Dabei hält ein kleiner Frischluft-Zusatzlüfter das Motorgehäuse unter Überdruck und deckt gleichzeitig die Leckverluste, so daß das Eindringen explosibler Gase verhindert wird. Der Zusatzlüfter dient auch zum Durchspülen der Maschine mit Frischluft vor der Inbetriebsetzung.

Als Stromrichter stehen für Leistungen bis etwa 500 kW kleine einanodige und für größere Leistungen bis etwa 2000 kW sechsanodige Quecksilberdampfgefäße mit Luftkühlung zur Verfügung. Für noch höhere Leistungen werden große, wassergekühlte Einanodengefäße eingesetzt. Die Stromrichtergefäße mit den dazugehörigen

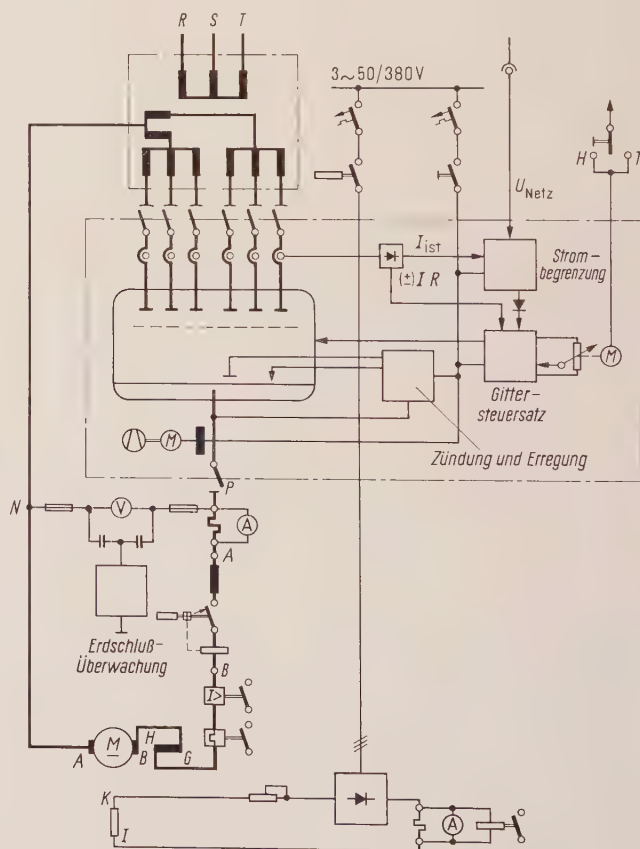


Bild 5 Grundsätzliche Schaltung eines Verdichterantriebes mit stromrichtergespeistem Gleichstrommotor

Einrichtungen für Zündung und Erregung, Steuerung und Überwachung werden in einem nicht explosionsgefährdeten Raum in der Nähe der Verdichter untergebracht. Die Transformatoren werden meistens im Freien aufgestellt.

Bild 5 zeigt die grundsätzliche Schaltung eines ausgeführten 660-kW-Antriebs für einen zweistufigen Kolbenverdichter mit einem Drehzahlbereich von 15 bis 160 U/min. Die Stromrichter werden in Saugdrosselschaltung betrieben, die bei günstiger elektrischer Ausnutzung des Transformators und der Ventile einen mit dem Sechsfachen der Netzfrequenz pulsierenden Gleichstrom liefert. Für die Glättung des Stromes reicht meistens die Ankerinduktivität des Motors aus, so daß auf besondere Glättungsdrosseln verzichtet werden kann. Im Ankerstromkreis liegt bei den mehranodigen Gefäßen ein Rückstrom-Schnellschalter, der im Fall einer Rückzündung den Stromkreis auftrennt und damit ein Rückspeisen des Motors auf die gestörte Anode verhindert. Einanodengefäße mit Luftkühlung werden durch Anodensicherungen geschützt.

Zum Einstellen der abgegebenen Gleichspannung dient ein Transistor-Gittersteuersatz, der die Zündimpulse für die Steuergitter erzeugt. Die Phasenlage der Zündimpulse zu den zugehörigen Anodenspannungen ändert sich proportional mit der Steuergleichspannung am Eingang des Steuersatzes. Zum vollen Durchsteuern von der Spannung 0 V bis zum vollen Wert der Ankerspannung ist eine Steuerspannung von 10 V erforderlich; der maximale Steuerstrom beträgt etwa 1,5 mA. Die Ankerspannung wird mit Hilfe eines motorbetätigten Potentiometers oder eines Drehgebers mit Druckknöpfen von Hand oder über einen Druckregler eingestellt.

Der Steuersatz enthält noch eine Transistor-Gittersperre, die beim Ansprechen augenblicklich die Erzeugung der Steuerimpulse unterdrückt, wenn durch unzulässige Überlastung oder infolge einer Störung ein bestimmter Stromwert überschritten wird. Dadurch wird der Antrieb in wenigen Millisekunden stromlos. Die Gittersperre wird über Anodenstromwandler ausgelöst.

Für die Druckregelung wurde ein Dreipunktregler mit unetstetiger Einwirkung auf die Stellgröße eingesetzt, dessen Arbeitsweise besonders für dynamisch langsam verlaufende Regelungsvorgänge geeignet ist. Zur elektrischen Messung des Druck-Istwertes dient ein Druckferngeber, bei dem eine Bourdonfeder unmittelbar auf den Anker eines Drehmelders wirkt. Seine abgegebene Spannung wird dem Regelverstärker als Eingangsgröße zugeführt. Die Druckmessung geschieht bei höheren Drücken nicht unmittelbar, sondern über Druckwandler. Der Sollwertgeber ist mit einem Anzeigeinstrument kombiniert, auf dem der eingestellte Sollwert und der augenblickliche Istwert abgelesen werden können. Der Regelverstärker

ist ein zweistufiger Magnet-Kippverstärker, der den Verstellantrieb für die Gittersteuerung im entsprechenden Sinn betätigt. Je nach dem Zeitverhalten der Regelstrecke erhält der Regler eine kapazitive oder thermische Rückführung.

Besondere Sorgfalt wurde dem Schutz gegen Ausfall der Antriebe infolge Netzspannungseinbrüchen gewidmet. Dabei war zu unterscheiden zwischen geringen Absenkungen, die sich über eine längere Zeitspanne erstrecken, und kurzzeitigen, aber tiefen Einbrüchen.

In Betrieben, die aus einem schwachen Netz versorgt werden, sind länger andauernde Spannungsabsenkungen um 10 bis 15% nicht ungewöhnlich. Für einen Gleichstrommotor, der aus dem Drehstromnetz über einen Feldgleichrichter erregt wird, wirkt sich eine Unterspannung außer auf die Ankerspannung auch als Feldschwächung und damit, bei gleichbleibendem Lastmoment, als Erhöhung des Ankerstromes aus. Die beiden ersten Komponenten heben sich in ihrer Auswirkung auf die Drehzahl etwa auf. Es verbleibt ein geringer Drehzahlabfall durch den erhöhten ohmschen Spannungsabfall im Ankerkreis. Durch den Strom wird der Motor allerdings ungefähr im Verhältnis der Spannungsabsenkung höher belastet. Ist mit dem häufigen Auftreten solcher länger andauernder Spannungsabsenkungen zu rechnen, so wird man den Antrieb bezüglich des Stromes nicht zu knapp auslegen und dem Stromrichtertransformator etwas Spannungsreserve geben.

Bei kurzen, tiefen Einbrüchen ist es nicht der vorübergehende Drehzahlabfall, der Sorgen bereitet, sondern die wiederkehrende Spannung, besonders dann, wenn sie schnell – innerhalb weniger Perioden – wieder auf den vollen Wert ansteigt. Während der Dauer des Spannungseinbruches ist der Motor stromlos, so daß wegen des fehlenden Antriebsmomentes die Drehzahl und damit die Gegen-EMK des Motors abfallen. Bei plötzlicher Wiederkehr der Netzspannung tritt nun die Differenz zwischen voller Ankerspannung und verminderter Gegen-EMK als treibende Spannung im Ankerkreis in Erscheinung und bewirkt einen Stromstoß, der den Motor möglichst schnell wieder auf die ursprüngliche Drehzahl beschleunigen will.

Dieser Stromstoß kann ein Vielfaches des Nennstromes erreichen und würde über die Überstrom-Schnellauslöser zum Abschalten des Antriebs führen. Um dies zu vermeiden, wurden die Antriebe mit einer Begrenzungseinrichtung für den Ankerstrom ausgestattet, die das Überschreiten eines bestimmten einstellbaren Wertes nicht zuläßt. Sie wirkt wie eine normale Ankerstromregelung: In einem Transistor-Regelverstärker wird durch Sollwert-Istwertvergleich die Regelabweichung erfaßt und der Stellbefehl gebildet, der über den Gittersteuersatz die Ankerspannung im entsprechenden Sinn nachstellt. Zur Strombegrenzung wird der Regelverstärker so geschaltet, daß an seinem Ausgang nur Befehle im Sinn einer



Ankerspannungsminderung auftreten können, also nur dann, wenn der Strom-Istwert den Sollwert übersteigt. Liegt der Strom unter dem eingestellten Sollwert, so gibt der Regler keinen Stellbefehl an den Steuersatz. In Bild 5 ist diese Eigenschaft durch ein Ventil im Ausgang des Stromreglers symbolisch angedeutet. Diese Einrichtung wirkt so schnell, daß ohne weiteres der stillstehende Motor auf die vollausgesteuerte Stromrichterspannung zugeschaltet werden konnte (Bild 6).

Nun ist aber im Normalbetrieb eine Strombegrenzung nicht immer erwünscht. Im Fall einer Betriebsstörung, die mit einem hohen Überstrom verbunden ist, würde nicht, wie gewünscht, der Überstrom-Schnellauslöser ansprechen, sondern der Antrieb würde so lange den Begrenzungsstrom führen, bis das thermische Überstromrelais auslöst. Deshalb wird die Strombegrenzung erst dann eingeschaltet, wenn die Netzspannung einen Grenzwert, z. B. 85 % des Nennwertes, unterschreitet. Die Strombegrenzung bleibt nur während der Dauer der Unterspannung und anschließend noch eine bestimmte einstellbare Zeit wirksam. Diese Zeit wird so groß gewählt, wie es dauert, um den Antrieb vom Stillstand aus mit dem Begrenzungsstrom bei vollem Gegenmoment auf die höchste Betriebsdrehzahl zu beschleunigen.

Größere Spannungseinbrüche können aber auch das Arbeiten der Hilfseinrichtungen des Stromrichters und der Überwachung des Antriebs stören. Deshalb wurden die Anlagen so ausgelegt, daß sie bis zu 60 % der Nenn-

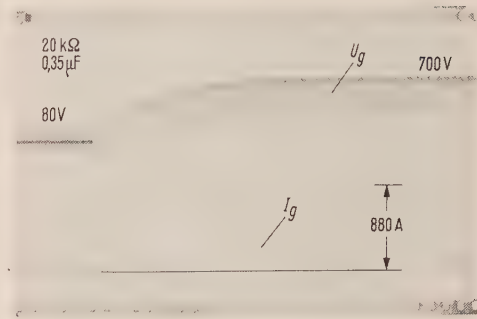


Bild 6 Zuschalten einer stillstehenden Gleichstrommaschine auf einen voll ausgesteuerten Stromrichter und Hochlauf mit Strombegrenzung

spannung noch zuverlässig arbeiten. Außerdem wurden alle Vorkehrungen getroffen, daß auch bei noch tieferen Einbrüchen oder völligem Ausfall der Spannung während einer Zeit bis zu 2 s alle Einrichtungen bei Wiederkehr der Spannung sofort voll betriebsfähig sind.

Mit Hilfe dieser Maßnahmen war es möglich, Kolbenverdichterantriebe für einen weiten Drehzahlbereich zu erstellen, die allen Betriebsanforderungen gerecht werden.

#### Schrifttum

- [1] Liwischitz, M.: Schwungmomente von Kolbenkompressoren bei Antrieb durch Asynchron- und Synchronmotoren. E. u. M. 52 (1934) 159 bis 164
- [2] Kübler, E.: Einfluß periodisch schwankenden Lastmomentes auf den Betrieb von Asynchron- und Synchronmotoren. E. u. M. 59 (1941) 58 bis 62
- [3] Hoffmann, H.: Aufbau und Wirkungsweise neuerzeitlicher Integrieranlagen. ETZ-A 77 (1956) 41 bis 52 und 77 bis 83

## Explosionssgeschützte Drehstrom-Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit«

VON MARTIN REINHARDT

### Allgemeines über Normmotoren

Die IEC-Publikation 72-1, 3. Ausgabe (1959), enthält Empfehlungen für die äußeren Hauptabmessungen von Motoren und Wellenenden sowie eine Leistungsreihe für geschlossene, oberflächenbelüftete Drehstrommotoren mit Käfigläufer [1]. Damit ist ein wesentlicher Schritt zur internationalen Normung von Motoren getan.

Die IEC-Publikation 72-1 enthält 35 verschiedene Bau-Größen mit Abmessungen in Millimetern, 18 verschiedene Wellendurchmesser (mit den jeweiligen maximal übertragbaren Drehmomenten bei Dauerbetrieb) und zwei Leistungsreihen, und zwar eine sogenannte Vorzugsleistungsreihe mit 25 Werten in PS und eine Leistungs-

reihe mit 17 Werten in kW. Die 35 verschiedenen Bau-Größen unterscheiden sich jedoch nicht in allen Maßen, sondern sind z. T. in Gruppen zusammengefaßt und nur durch die Baulänge unterschieden. Sie haben daher nur 15 verschiedene Achshöhen. So haben z. B. die drei größten Motoren die Bezeichnungen 315 S, 315 M oder 315 L. Jede dieser Bau-Größen hat die gleiche Achshöhe (315 mm) bei verschiedenen Baulängen (z. B. Fußlochabstand in Längsrichtung 406, 457 und 508 mm). Die übrigen Maße sind innerhalb der Bau-Größe 315 untereinander gleich.

Leider gelang es im Rahmen der IEC nicht, die Motorbau-Größen, Wellenenden und Leistungen einander zuzuordnen und damit einen internationalen Normmotor zu schaffen. Diese Zuordnung wurde den nationalen

Normausschüssen überlassen, wobei eine Angleichung, z.B. der europäischen Länder untereinander, erstrebt wird.

Der deutsche Fachnormen-Ausschuß erstellte daraufhin auf der Grundlage der von der IEC empfohlenen Werte zunächst die Norm DIN 42673 für geschlossene, oberflächenbelüftete Drehstrommotoren mit Käfigläufer, in der Baugröße, Wellenende und Leistung einander zugeordnet sind. Damit ist für Deutschland ein Normmotor festgelegt [2, 3].

Aus der IEC-Publikation 72-1 wurden 23 Baugrößen in das DIN-Blatt übernommen, wobei die gleiche Auswahl wie in der amerikanischen Vorschrift NEMA getroffen wurde. Die Leistungen wurden jedoch – den Gegebenheiten des deutschen Elektromotorenbaues entsprechend – anders, und zwar in Richtung höherer Leistungen als bei NEMA gewählt.

### Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit«

In der chemischen Industrie, in Ölraffinerien und in petrochemischen Betrieben Deutschlands werden viele explosionsgeschützte Drehstrommotoren mit Käfigläufer in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« (Ex) e verwendet. Die Schutzart »Erhöhte Sicherheit« gemäß VDE 0171 ist bei Käfigläufermotoren möglich, weil betriebsmäßig keine zündfähigen Funken oder Lichtbögen auftreten, eine Zündung also verhindert wird.

Der Explosionsschutz besteht darin, daß durch besondere Maßnahmen das Entstehen von Funken, Lichtbögen oder gefährlichen Temperaturen, die betriebsmäßig nicht auftreten können, auch für den Fall außergewöhnlicher Betriebsumstände verhindert wird. Die wichtigsten dieser Maßnahmen sind:

Auswahl geeigneter Werkstoffe und sorgfältige Ausführung

Berücksichtigung verschärfter Bestimmungen für Isolierstoffe, Luft- und Kriechstrecken

Einhaltung der gegenüber VDE 0530/59 um 10 grd geringeren Grenzübertemperatur der isolierten Wicklungen

Besondere konstruktive Vorkehrungen, wie z.B. die Sicherung aller Schraubverbindungen gegen selbsttätiges Lockern, und erhöhter Fremdkörperschutz

Begrenzung der Temperatur aller Bauteile auf Werte, die mit Sicherheit – bei blockiertem Läufer innerhalb der Erwärmungszeit  $t_E$  – unter der Zündtemperatur der jeweils vorkommenden Gase und Dämpfe liegen. Bei blockiertem Läufer muß der Motorschutzschalter innerhalb der Zeit  $t_E$  den Motor abschalten.

Diese Motorgattung ist mit geringen Änderungen von der normalen Ausführung der Motoren abgeleitet. Der Gedanke lag daher nahe, auch explosionsgeschützte Normmotoren in der Schutzart (Ex) e zu schaffen. In

Explosionsgeschützte Drehstrom-Normmotoren der Reihe e OR2 in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« (vorn und am Kran) werden für den Versand vorbereitet





DIN 42673, Blatt 2, ist dies bis einschließlich der Zündgruppe G 3 geschehen.

Explosionsgeschützte Normmotoren haben die gleichen Vorzüge wie Normmotoren in Normalausführung:

Die Anbaumaße der Motoren liegen eindeutig fest. Fundamente, Grundplatten, Befestigungsflansche und mechanische Übertragungsmittel können klar und wirtschaftlich projektiert werden.

Der Austausch gegen Ersatzmotoren oder normaler Motoren in explosionsgeschützte und die Lagerhaltung sind sehr einfach und wirtschaftlich.

Das Normblatt DIN 42673, Blatt 2, umfaßt explosiongeschützte Normmotoren im Leistungsbereich von 1 bis 120 kW für die Zündgruppen G 1 und G 2 sowie von 1 bis 100 kW für die Zündgruppe G 3 (vierpolige Ausführungen). Infolge der um 10 grd niedrigeren zulässigen Grenzübertemperatur der Isolierstoffe nach VDE 0171 und der Einhaltung der vorgeschriebenen Mindest- $t_E$ -Zeit mußten die Leistungen gegenüber der Normalausführung vermindert werden, und zwar bei den Zündgruppen G 1 und G 2 um etwa 10% und bei der Zündgruppe G 3 im Mittel um 20%. Im allgemeinen sind also Motoren für verschiedene Zündgruppen verschieden ausgeführt. Eine Ausnahme bilden Motoren der Zündgruppen G 1 und G 2. Kleine Motoren werden auch für höhere Zündgruppen wie Motoren der Zündgruppen G 1 und G 2 gebaut, wobei die jeweilige Grenze zwischen gleicher und ungleicher Ausführung mit zunehmender Polzahl zu größeren Leistungen ansteigt\*. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich auch bei anderen Polzahlen. Allerdings sind bei zweipoligen Motoren die erzielbaren Leistungen etwas niedriger und steigen mit der Polzahl geringfügig an.

Die explosiongeschützten Siemens-Normmotoren der Reihe eOR 2 bis Zündgruppe G 3 sind von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zugelassen.

Die Motoren (s. Bild) werden in Schutzart (Ex) e - P 33 (vollkommen geschlossen) nach DIN 40050 gebaut. Sie sind tropenfest und können im Freien sowie in staubiger und feuchter Umgebung betrieben werden.

Die Gehäuse, Lagerschilde und Füße bestehen aus Gußeisen, so daß die Motoren weitgehend unempfindlich gegen Korrosion durch Säuren und Laugen sind. Die Läuferoberfläche und die Ständerbohrung sind durch ein Korrosionsschutzmittel gegen Rost geschützt. Ein geräuscharmer Außenlüfter sorgt für eine gute Kühlung der mit Kühlrippen versehenen Gehäuseoberfläche, wodurch ein gleichmäßiges Temperaturgefälle im Motor erreicht wird. Alle Motoren haben geräusch- und schwingungsarme Wälzlager. Die Lager der kleineren

Motoren (bis 45 kW bei 1500 U/min) haben Dauerschmierung, die größeren haben eine Nachschmierung mit Fettmengenregler. Die geräumigen und in jeder Hinsicht stabilen Klemmenkästen in der Schutzart P 44 sind in Gehäusemitte angeordnet. Der Klemmenkasten enthält sechs Hauptklemmen und mindestens eine Schutzleiter-(Erdungs-)Klemme. Eine weitere Erdungsklemme befindet sich am Gehäusefuß. An alle Klemmen können die Zuleitungen ohne Kabelschuhe angeschlossen werden.

Auf eine gute elektrische Ausführung der Motoren wurde besonderer Wert gelegt. Die Wicklung, wie bisher bei Siemens-Motoren als Zweischichtwicklung ausgeführt, ergibt außer den bekannten technischen Vorteilen dieser Ausführung eine gute Hochlaufkennlinie infolge geringen Oberwellengehaltes sowie stabile kurze Wickelköpfe. Die Isolation (Lackdrahtisolation in Klasse E) entspricht aufgrund langjähriger Untersuchungen und Erfahrungen hohen Anforderungen hinsichtlich der Lebensdauer und Betriebssicherheit. Besonders wurde auf eine gute Tränkung der Wicklungen geachtet, um Lufteinschlüsse im Wickelkörper zu verhindern und die Wicklung rüttelfest zu machen. Der verwendete Tränklack ist von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für explosiongeschützte Motoren zugelassen.

Die bewährte Einteilung der Motormoment-Kennlinien in verschiedene Läuferklassen wurde auch bei den Normmotoren beibehalten. Langjährigen Erfahrungen entsprechend sind die Läuferklassen KL 7, KL 10, KL 13 und KL 16 den einzelnen Leistungs- und Drehzahlbereichen zugeordnet. Die Läuferklasse KL 16 besagt, daß der Motor bei direktem Einschalten gegen ein Lastmoment von 160% des Nennmomentes sicher hochläuft. Dies gilt entsprechend auch für die übrigen Läuferklassen.

Die explosiongeschützten Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« der Reihe eOR 2 genügen den meisten Anforderungen in explosionsgefährdeten Betriebsstätten. Nach VDE 0165 sind Motoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« nur dort nicht zulässig, wo mit dem dauernden Vorhandensein explosibler Gemische zu rechnen ist (z.B. in unbelüfteten Pumpengruben). In solchen Fällen oder wenn ausländische Vorschriften eingehalten werden müssen, die die Schutzart »Erhöhte Sicherheit« nicht kennen, stehen explosiongeschützte Drehstrommotoren in der Schutzart »Druckfeste Kapselung« zur Verfügung [4].

#### Schrifttum

- [1] Berckmüller, H. K.: Wie weit ist die Motornormung? Siemens-Elektrodienst 1 (1959) Heft 4
- [2] Martinson, W.: Die neuen Normmotoren der Baureihe OR 2. Siemens-Elektrodienst 2 (1960) Heft 2
- [3] Berckmüller, H.-K.: Normmotoren. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 258
- [4] Döll, J., Lutz, K. und Stanzel, O.: Druckfeste Motoren für Nieder- und Hochspannung. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 353 bis 358

\* Vgl. hierzu Bild 1 im Beitrag [4] auf Seite 354 dieses Heftes.

# Druckfeste Motoren für Nieder- und Hochspannung

VON JUSTIN DÖLL, KARLHEINZ LUTZ UND OTTO STANZEL

Die Entwicklung auf dem Gebiet der druckfesten Motoren wurde in den letzten Jahren durch folgende Umstände besonders beeinflusst:

- 1. Änderung der Vorschriften für explosionsgeschützte Betriebsmittel VDE 0171 im Jahre 1957
- 2. Normung der Anbaumaße für Drehstrom-Käfigläufermotoren und Leistungszuordnung nach DIN 42673 im Jahre 1960
- 3. Zunahme des Bedarfes an druckfesten Motoren größerer Leistung

### Auswirkung der Vorschriftenänderung

Mitte der fünfziger Jahre sah sich die zuständige VDE-Kommission gezwungen, die Vorschriften für explosionsgeschützte Betriebsmittel zu ändern. Der Grund hierfür waren neue Ergebnisse bei der Ermittlung der Zündtemperaturen explosibler Gase und Dämpfe, vor allem die starke Abhängigkeit der Zündtemperaturen von der Meßmethode und die Tatsache, daß für einige Stoffe unter bestimmten Bedingungen wesentlich niedrigere Zündtemperaturen festgestellt wurden, als sich nach den früher üblichen Methoden ergaben. Gleichzeitig wurden in die wichtigsten der gesetzlich verankerten VDE-Vorschriften für Explosionsschutz (0165 und 0171) auch andere Neuerungen, teils zur Angleichung an internationale Leitsätze, teils zur Erhöhung der Sicherheit, eingearbeitet [1].

Käfigläufermotoren sind auch in explosionsgefährdeten Räumen die verbreitetsten Antriebe. Als wichtigste Schutzarten sind »Erhöhte Sicherheit« (Ex)e und »Druckfeste Kapselung« (Ex)d für sie zugelassen [2, 3].

Während bei der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« eine Zündung verhindert werden soll [4], wird bei der Schutzart »Druckfeste Kapselung« in Kauf genommen, daß im Inneren des Motors u. U. eine Explosion auftritt. Das Gehäuse muß dem inneren Überdruck standhalten, und die Spalte an den Wellendurchführungen müssen so bemessen sein, daß die Explosion nicht nach außen durchzündet. Ferner muß gewährleistet sein, daß die druckfeste Kapselung während des Betriebes bestehenbleibt. Für die Ausbildung der Spalte und die Prüfung der Motoren ist dabei die Einteilung der Gase und Dämpfe nach ihrer explosiven Wirkung in die Explosionsklassen 1 bis 3n maßgebend. Schließlich muß gewährleistet sein, daß an der Außenseite der Gehäuse die Zündtemperatur

der betreffenden Gruppe explosibler Gase und Dämpfe (G1 bis G5) nicht erreicht wird.

Die erwähnte Feststellung neuer Werte für die Zündtemperaturen einiger explosibler Gemische machte es notwendig, die Zündgruppen neu einzuteilen. Außer der Herabsetzung der Grenztemperaturen zweier Zündgruppen (G4 und G5 gegenüber C und D) ist die Einführung der neuen Zündgruppe G3 für die wichtige Gruppe der Benzine zu erwähnen, die früher in die Zündgruppe A eingestuft waren (Tafel 1).

Zündgruppe nach VDE 0171/44		A	B	C	D
Zündtemperatur	°C	über 450	300 bis 450	175 bis 300	120 bis 175

Zündgruppe nach VDE 0171/57		G1	G2	G3	G4	G5
Zündtemperatur	°C	über 450	300 bis 450	200 bis 300	135 bis 200	100 bis 135

Tafel 1 Gegenüberstellung der Zündgruppeneinteilungen nach VDE 0171 von 1944 und 1957

Die zweite einschneidende Änderung der Vorschriften im Jahre 1957 betrifft nur Motoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit«. Zur Erhöhung der Lebensdauer der Wicklung und damit zur Steigerung der Sicherheit wurden für alle Isolierstoffklassen die zulässigen Grenzübertemperaturen gegenüber normalen Maschinen nach VDE 0530 um 10 grd zurückgesetzt. Dies allein bedingt bei gegebener Maschinengröße eine Verminderung der Leistung bis zu etwa 15%.

Durch diese Festlegung wurde die Grenze für den wirtschaftlichen Einsatz von (Ex)e- und (Ex)d-Motoren etwas zugunsten der druckfesten Motoren verschoben. Für Betriebe, in denen Benzindämpfe auftreten können, wirkt die erwähnte schärfere Beurteilung der Zündmöglichkeit der Benzine im selben Sinne. Aus diesem Grund und nicht zuletzt durch den Einfluß der amerikanischen Technik gewinnt der druckfeste Motor besonders in Betrieben der Erdölindustrie an Boden.



Ein Vorzug der druckfesten Motoren ist ihre vielseitige Einsatzmöglichkeit. In Tafel 2 sind die explosiblen Gase und Dämpfe nach Zündgruppen und Explosionsklassen geordnet (VDE 0171/9.57 § 13.2). Motoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit« sind für verschiedene Zündgruppen im allgemeinen verschieden ausgeführt [4]. Bild 1 gibt für vierpolige Motoren bei der jeweils günstigsten Bemessung die bei den einzelnen Zündgruppen erreichbaren Leistungen im Verhältnis zur Normleistung an. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich bei anderen Polzahlen. Motoren, die für höhere Zündgruppen gebaut sind, können zwar auch für niedrigere Zündgruppen eingesetzt werden, die erzielbaren Leistungen sind jedoch bei den höheren Zündgruppen so klein, daß eine allgemeine Einsatzmöglichkeit auf solche Weise teuer erkaufte würde. Günstigere Verhältnisse bietet der druckfeste Motor. Seine Leistung ist für alle Explosionsklassen und

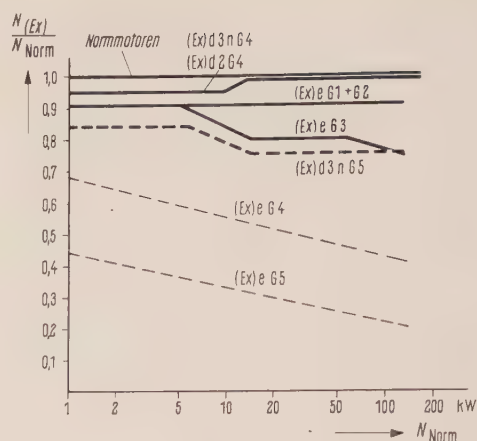


Bild 1 Leistung explosionsgeschützter vierpoliger Motoren (Ex)e und (Ex)d im Verhältnis zur Leistung der Normmotoren

		Zündgruppen				
		bei (Ex) e Einfluß auf Bemessung des ganzen Motors bei (Ex) d maßgeblich für zulässige Gehäusetemperatur				
		G1	G2	G3	G4	G5
Explosionsklassen bei (Ex) e ohne Bedeutung bei (Ex) d maßgeblich für die Ausbildung der Spalte	1	Ammoniak, Äthan, Benzol, Propan, Toluol, Kohlenoxyd, Methan, u. a.	Äthylalkohol, i-Amylacetat, n-Butan, n-Butyl- alkohol	Benzine, Erdöl*, n-Hexan	Azetalddehyd, Äthyläther	
	2	Äthylen, Stadtgas		Erdöl*		
	3a	Wassergas, Wasserstoff				
	b					Schwefel- kohlenstoff
	c		Azetylen			
	n	alle Gase der Klasse 3				

(Ex)d 2G4  
95 bis 100%  
der Normleistung
  (Ex)e G1 + G2  
etwa 90%  
der Normleistung
  (Ex)e G3  
90 bis 75%  
der Normleistung
  (Ex)d 3nG5  
85 bis 75%  
der Normleistung,  
überall einsetzbar

Tafel 2  
Einteilung explosibler Gase  
und Dämpfe in Zündgruppen  
und Explosionsklassen

\* je nach Zusammensetzung

für alle Zündgruppen von G1 bis G4 gleich und zum großen Teil gleich der Normleistung. Motoren für die Zündgruppe G5, die nur bei der Explosionsklasse 3b vorkommt (s. Tafel 2), haben eine gegenüber der Normleistung etwas zurückgesetzte Leistung.

Ein Motor (Ex)d3nG5 ist überall einsetzbar, er genügt bei allen bekannten explosiblen Stoffen den gegebenen Sicherheitsvorschriften. Der durch den konstruktiven Aufwand der druckfesten Kapselung und der Wellendurchführung bedingte höhere Preis schränkt jedoch den Einsatz von Motoren der Explosionsklasse 3n bei der Zündgruppe G5 auf Sonderfälle ein.

Zusammenfassend kann man sagen, daß (Ex)e-Motoren überwiegend für die Zündgruppe G2, aber auch für G3 vielfach verwendet werden. Die häufigste Ausführung druckfester Motoren ist (Ex)d 2G4.

**Druckfeste Niederspannungsmotoren dOR 2**

Die internationale Normung der Anbaumaße für Motoren nach der IEC-Publikation 72 (3. Ausgabe) und die in Deutschland genormte Zuordnung von Leistungen nach DIN 42673 für geschlossene oberflächengekühlte Drehstrom-Käfigläufermotoren hat bei den Siemens-Schuckertwerken zur Entwicklung der Normmotor-Reihe OR 2 geführt. Für druckfeste Motoren ist die Leistungszuordnung zu den Baugrößen nicht genormt; aber so, wie früher aus den Reihen OR 1 und OR 9 druckfeste dOR-Motoren abgeleitet worden waren [5, 6], steht nunmehr für den Einsatz in der chemischen Industrie und in der Erdölindustrie auch eine von den Normmotoren abgeleitete Reihe druckfester Motoren dOR 2 zur Verfügung, bestehend aus 21 Baugrößen mit genormten Anbaumaßen für Leistungen von 1 bis 132 kW. Die Fortsetzung für größere Leistungen bis 250 kW bildet die bewährte Reihe dOR 9.

Für die Motoren der Reihe dOR 2 sind die Standard-Bauformen B3, B5 und V1 sowie die daraus abgeleiteten Bauformen vorgesehen. Die Motoren werden zwei- bis achtpolig, die größeren auch zehn- und zwölfpolig gebaut. Die Ständerwicklung ist aus wärmebeständigem Lackrunddraht unter Verwendung hochwertiger Isolierstoffe aufgebaut und entspricht der Isolierstoffklasse E. Alle Motoren sind mit einem von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zugelassenen Tränklack imprägniert. Sie sind in der Schutzart »Druckfeste Kapselung« für die Explosionsklassen 2 oder 3n nach den Vorschriften VDE 0171 ausgeführt und entsprechen auch den Anforderungen der wichtigsten ausländischen Vorschriften. Die Schutzart nach DIN 40050 »Berührungs- und Fremdkörperschutz« ist P33.

Die Motoren der neuen Reihe haben gußeiserne Lager- schilde und Gehäuse mit Kühlrippen (Bilder 2 und 3). Für die Verbindungen ruhender Teile (Flansche, Dich-

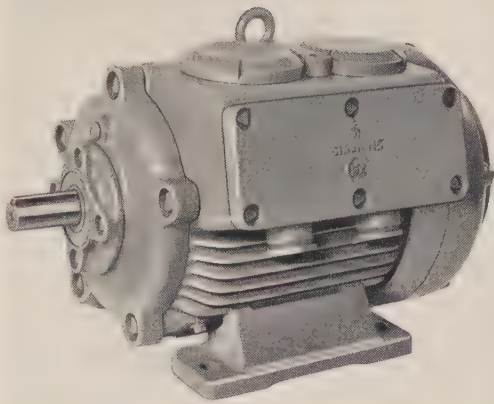


Bild 2 Druckfester Motor dOR 2, Ausführung für Leistungen unter 10 kW

tungen usw.) und für die Wellendurchführungen sind die Vorschriften für die Ausbildung der Spalte eingehalten. Um zu gewährleisten, daß die druckfeste Kapselung während des Betriebes aufrechterhalten bleibt, wurden Dreikantschrauben verwendet, die nur mit Sonderwerkzeugen gelöst werden können. Die Gehäusefüße sind, wie bei den normalen OR 2-Motoren, angeschraubt.

Die Maschinen haben Wälzlager. Bis zu der Leistung von 10 kW (vierpolig) werden die Motoren mit zwei Rillenkugellagern ausgeführt. Bei höheren Leistungen ist auf

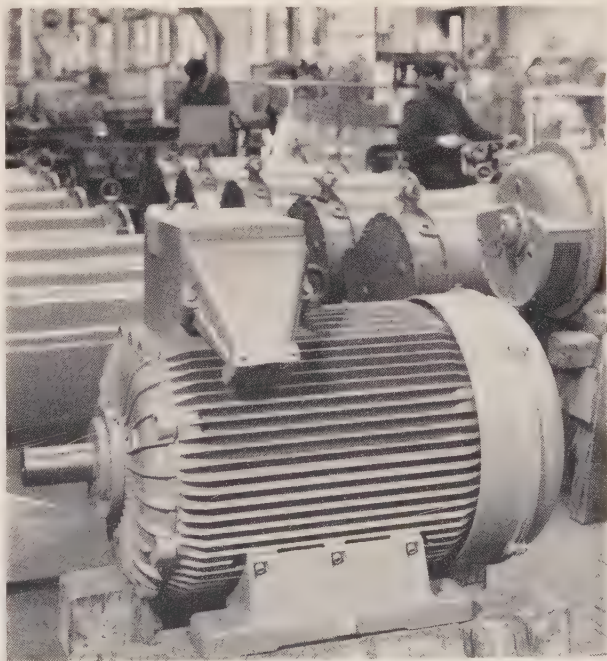


Bild 3 Druckfester Motor dOR 2 für Niederspannung und Leistungen über 10 kW



der Antriebsseite ein Zylinderrollenlager, auf der gegenüberliegenden Seite ein Rillenkugellager eingebaut. Diese Anordnung hat sich auch bei anderen Motorenreihen seit langem gut bewährt.

Die Lager werden mit Fett geschmiert. Die Fettschmierung ermöglicht eine einfache und raumsparende Kon-

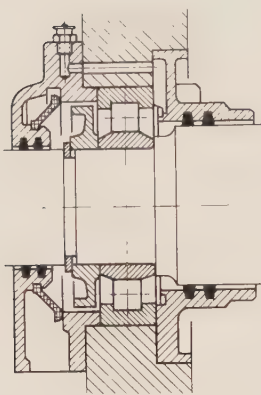


Bild 4 Schnitt durch einen Lagereinsatz mit Nachschmiereinrichtung

struktion der Lagereinbauteile. Sie erfordert wenig Wartung und hat den Vorzug, daß das Fett für das Lager einen idealen Schutz gegen das Eindringen von Staub und Fremdkörpern bietet.

Bei kleinen Motoren werden Wälzlager mit Fettvorratschmierung angewendet. Die größeren Motoren ab 55 kW (vierpolig) haben Nachschmiereinrichtungen (Bild 4), die es ermöglichen, die Lager auch während des Betriebes von Zeit zu Zeit mit neuem Fett zu versehen. Das Fett wird über einen Schmiernippel im äußeren

Lagerdeckel dem Raum zwischen dem Lager und dem inneren Lagerdeckel zugeführt. Von dort tritt das Fett von hinten in das Lager ein und schiebt dabei das zwischen den Wälzkörpern haftende Fett weiter. Eine Scheibe, vielfach als Fettmengenregler bezeichnet, die unmittelbar vor dem Wälzlager sitzt und mit dem äußeren Lagerdeckel einen Ringspalt bildet, sorgt selbsttätig dafür, daß der Raum um das Lager herum nie überfüllt wird. Sie schafft durch eine Art Pumpwirkung alles überschüssige Fett vom Lager weg in den Fettauffangraum des äußeren Lagerdeckels, der so geräumig ist, daß das verbrauchte Fett von mehreren Schmierungen aufgenommen werden kann.

Zur Erhöhung des Staubschutzes ist bei den Motoren mit Vorratschmierung auf der Welle unmittelbar vor dem äußeren Lagerdeckel ein sogenannter Staubring angeordnet, wogegen bei den Lagern mit Nachschmierung auf der Innenseite des äußeren Lagerdeckels eine elastische Kegelmembran den Lagerraum dicht abschließt. Die Kegelmembran ermöglicht zwar den Fettaustritt aus dem Ringspalt, verhindert aber das Eindringen von Fremdkörpern in den Lagerraum. Damit sind die Lagerinnenräume nach außen so abgedichtet, daß auch in Betrieben mit staubhaltiger Luft und bei Feuchtigkeitseinwirkung hinreichende Betriebssicherheit gewährleistet ist.

Besondere Sorgfalt wurde auf die Durchbildung des Klemmenkastens gelegt. Er enthält sechs Anschlußklemmen und zwei Schutzleiterschrauben (Bild 5). Außerdem kann noch eine Reihe von Zusatzklemmen für den Anschluß von Wärmewächtern eingebaut werden. Die Klemmen sind als Bügel- oder Laschenklemmen ausgebildet und so angeordnet, daß die Zuleitungen in allen möglichen Stellungen des Klemmenkastens günstig und ohne Kabelschuhe betriebssicher angeschlossen werden können. Mit geeigneten Staffelstücken können die Klemmen bei Bedarf in der Höhe gestuft werden. Als Klemmenträger dienen druckfeste Isolierkörper aus Steatit, die in die Klemmenplatte am Gehäuse eingeschraubt sind.

Bei den Baugrößen für Motorleistungen von 1 bis 10 kW sind die Anschlußklemmen raumsparend (tangential) angeordnet. Dadurch ergeben sich günstige Verhältnisse zwischen Motor und Klemmenkasten, da der Klemmenanschluß in das Motorgehäuse mit einbezogen werden kann. Durch einfaches Drehen des Gehäuses kann der Klemmenkasten rechts oder links gelegt werden. Bei den übrigen Baugrößen ist der Klemmenkasten oben am Häuserücken angeordnet und von 90 zu 90° verdrehbar. Dabei bleibt die Klemmenplatte, die den Motorraum druckfest abschließt, mit dem Gehäuse verbunden. Der Klemmenkasten selbst genügt den Anforderungen beider Schutzarten (Ex)e und (Ex)d. Welcher Schutzart der Klemmenkasten nach dem Anschluß ans Netz entspricht, richtet sich nach den verwendeten Einführungs-

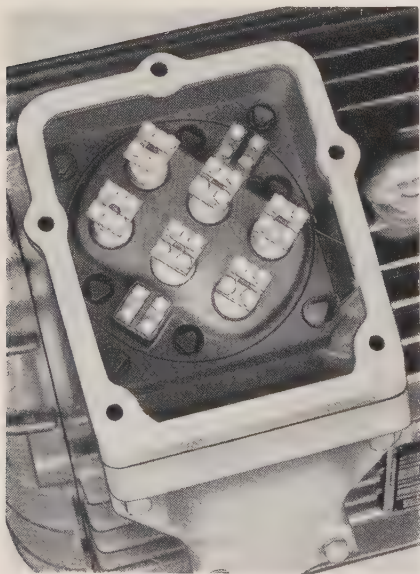


Bild 5 Klemmenanordnung im Klemmenkasten eines Niederspannungsmotors

stutzen. Die Vorschriften VDE 0171 schreiben für den eigentlichen Anschlußraum des Klemmenkastens die Schutzart »Erhöhte Sicherheit« vor. Es wurden daher Kabeleinführungen ähnlich wie bei den normalen Klemmenkästen vorgesehen, die für den Anschluß des Kabels unter Anwendung eines Gummiendverschlusses verwendet werden. Nach Anbau eines besonderen Einführungsstutzens mit Zugentlastung für das Kabel an den Klemmenkasten entsprechen die Motoren auch den Vorschriften VDE 0170 für den Schlagwetterschutz Schutzart (Sch)d.

Bei Ausführungen nach ausländischen Vorschriften wird der Klemmenkastenraum durch druckfeste Leitungseinführungen abgeschlossen. Alle Kabeleinführungen können auch mit vergießbaren Kabelendverschlüssen ausgeführt werden.

### Druckfeste Hochspannungsmotoren dOR 2

Seit einigen Jahren zeichnet sich aus den eingangs erwähnten Gründen eine zunehmende Neigung zum Einsatz von druckfesten Hochspannungsmotoren größerer Leistung ab [7], die dazu geführt hat, daß in Deutschland solche Motoren vereinzelt bis zu Leistungen von 1000 kW und darüber gebaut worden sind. Zu den Problemen, die beim Bau großer geschlossener Motoren zu lösen sind, treten bei druckfesten Maschinen weitere hinzu. Es sei nur an die druckfeste Gestaltung der Kühlelemente (z.B. Rohre und Taschen) erinnert und an die Tatsache, daß im Inneren der Motoren unterteilte Räume weitgehend vermieden werden müssen, weil sonst bei einer Explosion sehr hohe Drücke durch Vorkompression auftreten können.

Um diese zusätzlichen Schwierigkeiten zu vermeiden, haben die Siemens-Schuckertwerke eine Reihe druckfester Hochspannungsmotoren mit Rippenkühlung entwickelt. Die folgerichtige Weiterführung dieses Prinzips bei günstigster Belüftung und Verteilung der Verluste ermöglicht es, die Grenzleistung in dieser Bauart gegenüber bisher ausgeführten Motoren zu erhöhen. Vorteile der Rippenkühlung sind geringes Gewicht der Motoren und einfache Gestaltung der druckfesten Gehäuse.

Die neuen Hochspannungsmotoren der Reihe dOR 2 gibt es vorerst in sieben Baugrößen, beginnend mit der Leistung von 125 kW für 6 kV. Die Motoren werden zwei- bis zwölfpolig gebaut. Die Standardbauform ist B3. Die Ständerwicklung der Hochspannungsmotoren besteht aus wärmebeständig isoliertem Flachdraht mit hochwertiger Glasseidenumspinnung unter Verwendung ausgesuchter Isolierstoffe, besonders von Glimmer. Sie

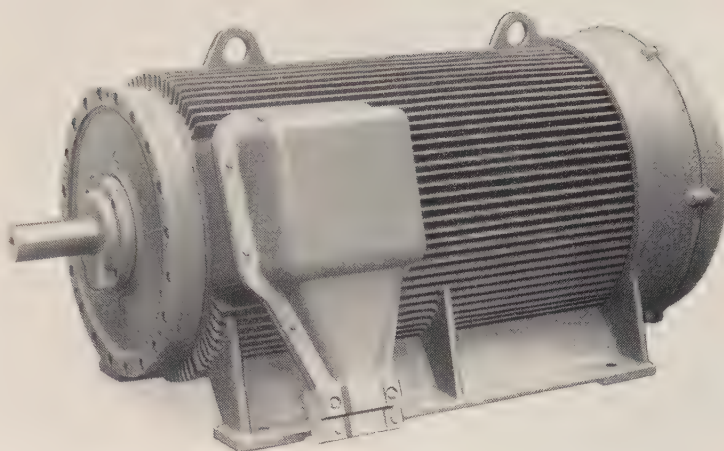


Bild 6 Druckfester Hochspannungsmotor dOR2 für 500 kW, 6 kV, 50 Hz, 1500 U/min

entspricht der Isolierstoffklasse B. Alle Motoren sind mit einem von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zugelassenen Tränklack imprägniert. Die Maschinen sind nach den Vorschriften VDE 0171 für Explosionsschutz in der Schutzart »Druckfeste Kapselung« ausgeführt und entsprechen auch den wichtigsten ausländischen Vorschriften. Die Schutzart nach DIN 40050 »Berührungs- und Fremdkörperschutz« ist P33.

Die Motoren dieser Reihe haben ein geschweißtes Stahlgehäuse mit aufgeschweißten Kühlrippen (Bild 6). Die Wälzlager haben die gleiche Nachschmiereinrichtung wie die Lager der größeren Niederspannungsmotoren.

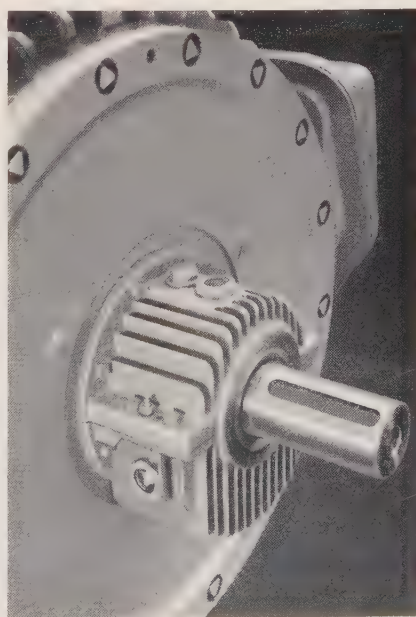


Bild 7  
Luftgekühltes  
Gleitlager



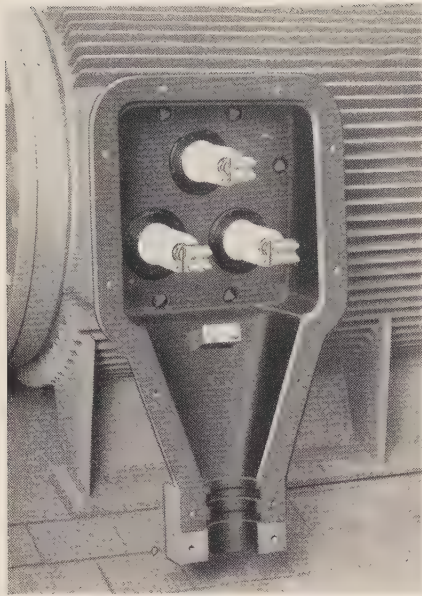


Bild 8  
Klemmen-  
anordnung im  
Klemmenkasten  
eines Hoch-  
spannungs-  
motors

Die fünf größten zweipoligen Motoren erhalten Gleitlager. Damit ein Gleitlager im Gebiet der flüssigen Reibung arbeitet, muß nicht nur der richtigen Bemessung der Laufflächen und des günstigsten Lagerspieles, sondern auch der richtigen Wahl der Ölviskosität, der sicheren und reichlichen Schmiermittelzufuhr und der Abführung der Verlustwärme besondere Beachtung geschenkt werden.

Um eine möglichst gute Kühlwirkung zu erreichen, wurde das Lagergehäuse stark verrippt (Bild 7). Zur Öl-

versorgung dient ein loser Schmierring, der mit der Welle umläuft und reichlich Öl vom Ölsumpf zur Lagerstelle fördert.

Der Klemmenkasten für die Hochspannungsmotoren (Bild 8) ist geschweißt und in Schutzart (Ex)e-P44 ausgeführt. Den Abschluß des druckfesten Motorraumes bildet der Unterteil des Klemmenkastens, in dem drei druckfeste Durchführungen als Klemmenträger eingeschraubt sind (Anordnung entsprechend DIN 42962). Die Anschlußklemmen sind als Bügel- oder Laschenklemmen ausgebildet und ermöglichen den betriebssicheren Anschluß der Zuleitungen ohne Kabelschuhe. Außer den drei Klemmen ist eine Schutzleiterklemme vorhanden. Eine Zugentlastung am Einführungsstutzen hält Zugbeanspruchungen von den Klemmen und Isolatoren fern. Der Klemmenkasten befindet sich normalerweise seitlich am Motorgehäuse und kann rechts oder links, von der Antriebsseite aus gesehen, angebaut werden. Er ist von 90 zu 90° verdrehbar. Bei Bedarf kann der Motor auch mit zwei Klemmenkästen ausgeführt werden.

#### Schrifttum

- [1] Olenik, H.: Fortschritte auf dem Gebiet des Explosionsschutzes und ihre Verankerung in den Vorschriften. *Elektro-Welt* (1959) 185 bis 187
- [2] Falck, W.: Explosionengeschützte Motoren. *Erdöl und Kohle* 11 (1958) 95 bis 98
- [3] Wettstein, W.: Explosionengeschützte Motoren. *Elektro-Welt* (1959) 193 bis 196
- [4] Reinhardt, M.: Explosionengeschützte Drehstrom-Normmotoren in der Schutzart »Erhöhte Sicherheit«. *Siemens-Zeitschrift* 35 (1961) 350 bis 352
- [5] Müller, F.: Druckfeste Motoren von 1 bis 10 kW. *Siemens-Zeitschrift* 31 (1957) 144 bis 146
- [6] Voll, S.: Eine neue Reihe druckfester Drehstrommotoren mit Käfigläufer für die chemische Industrie. *Siemens-Zeitschrift* 29 (1955) 152 und 153
- [7] Scherb, E.: Druckfest gekapselte, explosionengeschützte Hochspannungsmotoren. *Siemens-Zeitschrift* 32 (1958) 320 bis 323

## Die digitale Tankstandmessung als Grundlage zur Ermittlung des wahren Tankinhalts

VON BERTOLD BLÄSS

In Tanklagern und Raffinerien hat die selbsttätige Ermittlung des wahren Tankinhalts in Gewichtseinheiten in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Bei zylindrischen Tanks sind vier Komponenten ausschlaggebend: Tankstand, Temperatur, Dichte und Tankquerschnitt. Die bisherigen Verfahren, den Tankstand vom Dach des Tanks aus mit einem Peilband zu messen, ist sehr umständlich und zeitraubend. Auch ist die Zuverlässigkeit des Meßergebnisses von der menschlichen Unzulänglichkeit abhängig. Das gleiche gilt für die Temperaturmessung, zu der bisher ein Thermometer ebenfalls vom Tankdach aus in die Flüssigkeit hinabgelassen wird.

Die Dichte wird meistens anhand von Proben im Laboratorium bestimmt.

Ein anderes Verfahren beruht auf der Messung des hydrostatischen Druckes in Höhe des Nullniveaus. Man erhält daraus und aus dem Tankquerschnitt das Gewicht des Tankinhaltes. Daneben interessieren aber nach wie vor Dichte und Temperatur.

An Flüssiggasbehältern wendet man wegen ihrer Kugelgestalt und des hohen Druckes auch andere Verfahren an (z. B. Wägung des Kugeltanks mit Kraftmeßdosen). Bei neuzeitlichen Anlagen werden die einzelnen Werte in einer Zentrale zusammengefaßt und zu den gewünschten

Endergebnissen verarbeitet. Sie müssen also von den jeweiligen Meßstellen dorthin übertragen werden. Wegen der geforderten Genauigkeit ist eine digitale Darstellung der Meßergebnisse unbedingt notwendig.

Neben dem Endergebnis der Meßwertverarbeitung werden auch noch die Werte aus den Einzelmessungen gebraucht. Hierzu rechnen der Tankstand, weil nach ihm unmittelbar der Plan für das Füllen oder Leeren der einzelnen Tanks aufgestellt werden kann, und die Dichte, weil sie ein Maß für die Güte des Stoffes ist. Für die mehr zu Überwachungsaufgaben dienende Tankstandmessung wird aber keine so große Genauigkeit gefordert; 1 % der Füllhöhe genügt hier. Es ist jedoch zweckmäßig, das ohnehin für die genaue Messung vorhandene Gerät auch hierfür zu benutzen.

Das Problem der Tankstandmessung ist nicht nur deshalb meßtechnisch besonders interessant, weil neben Robustheit, Explosionssicherheit und Korrosionsfestigkeit der Meßgeräte eine extrem hohe Genauigkeit gefordert wird, sondern auch, weil wegen der Verwendung der Meßergebnisse im eichpflichtigen Verkehr eine besonders hohe Zuverlässigkeit notwendig ist. Messungen, die irgendwie fehlerhaft oder gar gezielt verfälscht sind und Übertragungsstörungen müssen in jedem Fall erkannt werden, sofern sie überhaupt zustande kommen. Auch für die anschließende Meßwertverarbeitung sind entsprechende Kontrollen erforderlich.

Die Übertragung des Tankstandes an die Warte, die bis zu einigen Kilometern vom Tankfeld entfernt sein kann, verlangt am Meßort die Umwandlung eines Längenmaßes, wie es die Füllhöhe im Tank darstellt, in eine elektrische Größe, die sich ebenfalls mit der geforderten Genauigkeit übertragen läßt.

Eine analoge Darstellung der Füllhöhe als Spannung oder Strom, also als Amplitude, scheidet wegen der geforderten hohen Genauigkeit aus. Bei dieser ist eine Verarbeitung nur auf digitalem Wege möglich. Zu fragen ist, wo der Digitalwert jeweils gebildet werden soll. Wollte man ihn schon im Sender bilden und von da aus übertragen, so benötigte man dort in jedem Fall einen Speicher (Codescheibe, Transistorkippstufen, Relais) und entweder bei Parallelübertragung für jede Binär-Stelle eine Ader, d. h. mindestens 14 Adern, oder bei Serienübertragung in jedem Sender eine Einrichtung zur Parallel-Serien-Umsetzung. Bildet man dagegen den Digitalwert in einem für alle Meßstellen gemeinsamen Empfänger, so kann man den hauptsächlichen Teil des für die Analog-Digital-Umsetzung erforderlichen Aufwandes dorthin legen.

### Sendeteil

Dies ist bei einem im Wernerwerk für Meßtechnik entwickelten Gerät möglich, das einen Analog-Digital-Umsetzer nach dem Sägezahnprinzip darstellt. Normalerweise werden dabei abhängig von einer Zeitbasis so lang

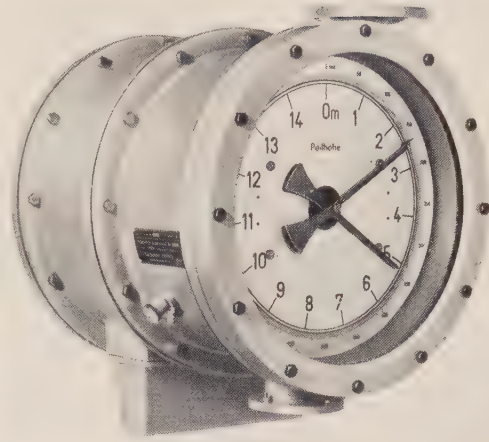


Bild 1 Sendeteil des Tankstandmessers

Impulse erzeugt und gezählt, bis eine linear ansteigende Spannung die zu messende Spannung erreicht hat. Beim Tankstandmesser werden abhängig vom Winkel zwischen Null und Zeigerstellung Impulse in entsprechender Anzahl von der Sendeeinrichtung abgegeben, über eine Leitung übertragen und im Empfänger zur Bildung des Digitalwertes gezählt. Über eine Anwahlschaltung kann eine große Anzahl von Sendern an einen Empfänger angeschlossen werden. Der Hauptaufwand liegt auf der Empfangsseite, so daß die Vorteile der Genauigkeit und Sicherheit des Verfahrens bei insgesamt verhältnismäßig geringem Aufwand gewährleistet bleiben.

Das eigentliche Meßgerät auf der Sendeseite (Bild 1) wurde von der Firma Hydro-Apparate-Bauanstalt entwickelt. Die Füllhöhe des Tanks wird mit einer Schwimmerplatte über einen dünnen Draht auf eine Trommel von genau 1 m Umfang übertragen. Starr mit ihr gekuppelt ist ein Zeiger; ein weiterer Zeiger ist über ein Getriebe entsprechend dem Meßbereich untersetzt, so daß

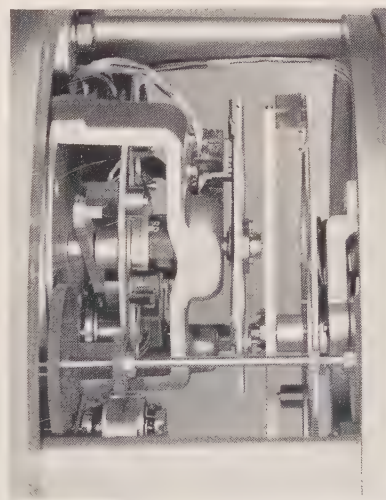


Bild 2 Abtastwerk im Sendeteil des Tankstandmessers



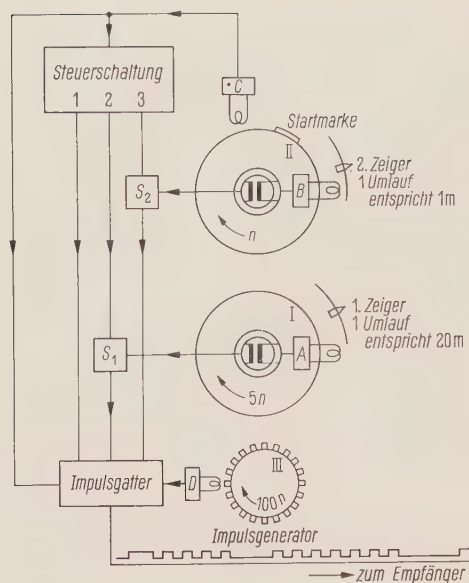


Bild 3 Blockschaltung des Senders, unten Impulsprogramm

der Tankstand mit Hilfe dieser beiden Zeiger auf 1 mm genau abgelesen werden kann.

Zu diesem Gerät wurde von Siemens & Halske als Anbauteil ein Abtastwerk zur Fernübertragung der Zeigerstände entwickelt. Um dichte Durchführungen, die wegen des geringen zur Verfügung stehenden Drehmomentes keine Reibung haben dürften, zu umgehen, wurde das Abtastwerk (Bild 2) mit in dem Gehäuse untergebracht, das zu diesem Zweck etwas verlängert wurde. Es kann auf einfache Weise mit wenigen Schrauben montiert oder demontiert werden, ohne die örtliche Anzeige zu stören. Dadurch ist es allerdings der aggressiven Atmosphäre des Tankraumes ausgesetzt und muß deshalb vollständig aus korrosionsfestem Material ausgeführt sein. Sämtliche elektrischen Bauteile sind so bemessen, daß keine zündfähige Erwärmung oder Funkenbildung auftreten kann. Die Explosionssicherheit wurde teils durch Vergießen erreicht, teils dadurch, daß die Energie, die in einem Störfall auftreten kann, weit unter der für eine Zündung ausreichenden Größe bleibt (Eigensicherheit).

Die ganze Abtasteinrichtung arbeitet völlig ohne Kontakte (Bild 3). Mit A, B, C und D sind Hochfrequenzschwingkreise bezeichnet, deren Schwingspulen angedeutet sind. Diese Schwingspulen arbeiten mit Metallfahnen zusammen. Zwei davon sind den beiden Zeigern zugeordnet, eine dritte Fahne markiert den Nullpunkt (Startmarke), und schließlich dient ein Rad mit 20 Fahnen zum Erzeugen von Impulsen. Die Metallfahnen unterbrechen beim Eintauchen zwischen die Spulen die Rückkopplung, woraus Signale abgeleitet werden. Die drei Teile I, II und III werden von einem kleinen Motor angetrieben und laufen mit den angegebenen Drehzahlen um.

Die Grunddrehzahl ist ungefähr  $n = 30$  U/min. Die Energie wird den Schwingkreisen A und B schleifringlos auf induktivem Wege zugeführt, die HF-Energie auf demselben Wege abgenommen. Einfache Filter sorgen für die Trennung. Der Impulsgenerator liefert 400 Impulse während einer Umdrehung des Teiles I, d. h. je abgetastetem Dezimeter 2 Impulse, während er bei einer Umdrehung des Teiles II 2000 Impulse, d. h. je Millimeter 2 Impulse, abgibt. Der Fehler bei der Abtastung beträgt mit diesen Werten  $\pm 0,5$  mm, wozu unter Berücksichtigung des Zahnspeiles im Getriebe maximal 0,3 mm kommen können. Er entspricht damit also der Ablesegenauigkeit an der Skale. Da der Impulsgenerator mit den Abtastorganen über Zahnräder gekuppelt ist, erzeugt er Impulse in Abhängigkeit von der Drehung des Abtastwerkes. Die Drehzahl selbst spielt dabei keine Rolle.

Die Steuerschaltung erhält Signale von der Startmarke über den ihr zugeordneten Schwingkreis C und steuert damit den Ablauf der gesamten Abtastung abhängig von der Drehung des Abtastwerkes. Steht die Steuerschaltung auf Stellung 1 (in Bild 3), so gibt sie den beim Durchlaufen der Startmarke durch die Spulen des Schwingkreises C entstehenden Langimpuls durch das Impulsgatter frei. Bei Ende des Durchlaufes wird die Steuerschaltung durch das Wiedereinsetzen der Schwingungen auf Stellung 2 geschaltet und öffnet über S 1 das Impulsgatter für den Impulsgenerator. Begegnen nun beim weiteren Umlaufen des Abtastwerkes die dem Schwingkreis A zugehörigen Spulen der Fahne des ersten Zeigers, so wird über S 1 das Impulsgatter wieder geschlossen. Unmittelbar auf den Langimpuls ist also eine dem Höhenstand proportionale Anzahl von Impulsen abgegeben worden. Der nächste Durchlauf der Startmarke findet das Impulsgatter geschlossen, es wird kein Langimpuls abgegeben. Beim Ende des Durchlaufes wird die Steuerschaltung auf 3 geschaltet und öffnet, diesmal über S 2, das Impulsgatter wieder, bis es von der Fahne geschlossen wird, die mit dem zweiten Zeiger verbunden ist. Während dieser Zeit ist also eine Impulszahl abgegeben worden, die der Unterteilung des betreffenden Meterabschnittes entspricht. Ist der Wert, der auf der Skale auch örtlich abgelesen werden kann, z. B. 12,534 m, so werden mit den angegebenen Daten in der ersten Impulsreihe nach dem Langimpuls 250, in der zweiten Serie 1068 Impulse abgegeben.

### Empfangsteil

Im Empfänger (Bild 4) wird nun der Digitalwert durch Auszählen der beiden Impulsreihen und Vereinigung der Einzelergebnisse in einem Speicher gewonnen. Außerdem wird hier die Arbeitsweise der gesamten Anlage überwacht. Die Kontrolleinrichtungen sind also zentral angeordnet und fallen bei einer größeren Anlage trotz ihres Umfangs nicht sehr ins Gewicht. Von ihnen werden Störungen im Sender, auf dem Übertragungsweg oder im Empfänger erkannt und gemeldet.



Bild 4 Empfangseinrichtung des Tankstandmessers mit (von oben nach unten) Netzteil, Speicher mit Hilfsspeicher, Übernahmeschaltung und Eingangsschaltung, Zähler und Kontrollzähler

Die Eingangsschaltung des Empfängers (Bild 5) übt Steuer- und Kontrollfunktionen aus. Sie ist als elektronische Baueinheit aus Flip-Flops und Gattern aufgebaut. Mit Hilfe des Langimpulses vor der ersten Impulsserie werden der Beginn der Abtastperiode und die Wertigkeiten der beiden Impulsserien erkannt.

Gezählt werden die Impulse von einem elektronischen Zähler. Am Ende jeder Serie wird das Ergebnis an die Übernahmeschaltung weitergegeben und von dort, je nach Wertigkeit, an den Hilfsspeicher oder den Speicher. Der vollständige Wert wird gebildet, wenn die zweite

Impulsserie zu Ende ist. Das Ergebnis der zweiten Zählung wird in den Speicher übernommen. Gleichzeitig wird der aus der ersten Serie gewonnene Wert durch Übernahme der Meterstellen aus dem Hilfsspeicher dem zweiten Wert zugefügt, so daß nun das gesamte Ergebnis im Speicher enthalten ist. Beim Zusammenfügen des Gesamtwertes muß noch eine gegebenenfalls nötige Korrektur beachtet werden; da es technisch unmöglich ist, beide Zeiger genau in Übereinstimmung zu bringen, könnte beim Übergang von einer Meterzahl zur nächsten ein falscher Wert zustande kommen. So kann z. B. die Zählung der ersten Impulsserie 12,0 m, die der zweiten Impulsserie 0,998 m ergeben. Bei einer solchen Verschiedenheit der Dezimeter-Stellen zieht eine Korrekturschaltung von der zu übernehmenden Meterzahl 1 m ab. Der richtige Gesamtwert heißt dann 11,998 m und nicht 12,998 m. Auch dieser Vorgang wird auf seine Richtigkeit über-

prüft. Die Abtastorgane des Senders sind so eingestellt, daß eine Korrektur nur nach einer Seite notwendig ist, d. h., die Korrekturschaltung muß allenfalls eine 1 abziehen. Erst nach störungsfreiem Ablauf des gesamten Abtastprogramms von Langimpuls zu Langimpuls wird das Ergebnis zur weiteren Verarbeitung oder Anzeige ausgegeben. Gleichzeitig mit der Ausgabe wird auch die Nummer des angewählten Tanks zusammen mit dem Ergebnis weitergegeben, so daß eine Verwechslung nicht möglich ist.

Kontrolleinrichtungen

Die Kontrolleinrichtungen, deren Organe in die Empfangseinrichtung eingebaut sind, seien im folgenden für sich behandelt, da sie sich auf die ganze Anlage auswirken. Störungen können auftreten: im Sender, auf dem Übertragungswege und im Empfänger.

So hören z. B. beim Versagen eines Teiles im Sender (Abtast-Kreise A oder B, Steuereinheiten S 1 oder S 2, Impulsgatter) die Impulsserien nicht mehr auf. Es werden dann mehr Impulse abgegeben, als regulär abgegeben werden könnten. Bei einer solchen Störung werden die Zählketten über ihren Maximalwert hinaus gefüllt, und eine Maximalwertkontrolle spricht an.

Andere denkbare Störungen im Sender (des Impulsgenerators, des Impulsgatters, der Steuerschaltung) oder Stehenbleiben des gesamten Abtastwerkes könnten z. B. dazu führen, daß überhaupt keine Impulse zum Empfänger gelangen. Dies wird durch ein Zeitrelais erkannt, das nach einer gewissen Zeit anspricht, nach der eine Abtastperiode sicher abgeschlossen sein mußte. Bei anderen Störungen

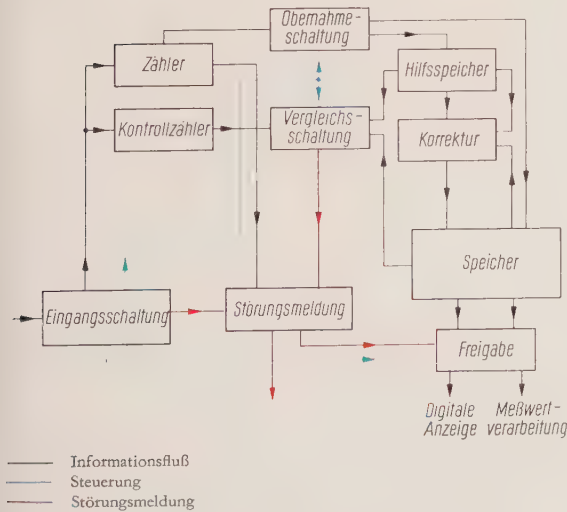


Bild 5 Blockschaltung des Empfängers



gen der Steuerschaltung wird das Abtastprogramm nicht eingehalten. Da die Impulsreihen zwischen zwei Langimpulsen gezählt werden, lassen sich auch diese Störungen des Senders erkennen.

Als Störungen auf der Leitung können zusätzliche Impulse, Ausfall einzelner Impulse oder Leitungsunterbrechung oder -kurzschluß auftreten. In den beiden letztgenannten Fällen kann kein Wert übertragen werden; das bereits erwähnte Zeitrelais spricht also auch hierbei an.

Störimpulse, die von außen kommen, werden aufgrund des feststehenden Programms und der annähernd konstanten Impulsfrequenz mit größter Sicherheit erkannt. Ein Störimpuls mitten in einer Impulsreihe wird von einem elektronischen Zeitglied dadurch festgestellt, daß die Folgezeit der eintreffenden Impulse dann sehr viel kleiner wird. Verwischt er mit einem regulären Impuls, so wird er zwar nicht erkannt, stört aber dann auch nicht. Auch bei Ausfall eines oder einiger Impulse innerhalb einer Reihe wird die Impulsfolge gestört. Der Empfänger prüft in diesem Fall, ob die Reihe wirklich zu Ende ist oder ob nach einer gewissen Zeit nicht doch noch weitere Impulse eintreffen. Je nachdem wird der Wert aus der Zählkette übernommen oder Störung gemeldet. Störimpulse zwischen zwei Reihen werden aufgrund des Impulsprogramms erkannt (vgl. Bild 3): Langimpuls, erste Impulsreihe, Pause, zweite Impulsreihe, Pause, nächster Langimpuls. Diese Folge wird, wie schon erwähnt, durch Zählung der Impulsreihen überwacht. Wird sie infolge von Störungen nicht eingehalten, so wird dies erkannt und gemeldet.

Zur Sicherung der Zählung wurde eine zweite elektronische Zählkette eingesetzt, die parallel mit dem schon erwähnten Zähler arbeitet. Nach Beendigung jeder Zählung und Übernahme in die Speicher wird der jeweilige Speicherinhalt mit der Kontrollzählkette verglichen.

### Gesamtanlage

Nach Ablauf einer Abtastperiode schaltet entweder die Anwahlschaltung selbsttätig auf den nächsten Tank weiter, oder es wird von Hand ein beliebiger Tank angewählt. In beiden Fällen kann man sich entweder mit Anzeigen begnügen oder das Ergebnis von einem Drucker festhalten lassen. Für jeden Tank werden bei ungestörter Messung zwischen 7 und 14 s einschließlich Umschalt-dauer benötigt.

Bei Anwahl von Hand ist es auch möglich, den Füll- oder Entleerungsvorgang einzelner Tanks besonders zu beobachten. Eine genaue Messung ist allerdings während des Füllens und Leerens wegen des unruhigen Flüssigkeitsspiegels nicht möglich, aber auch nicht nötig.

Über die Anwahlschaltung werden gleichzeitig noch andere Größen durchgeschaltet, die mit der Füllhöhe im Tank entscheidenden Einfluß auf das Gewicht des Tank-

inhalts haben. Es sind dies die Dichte und die Temperatur. Auf die Messung dieser beiden Einflußgrößen und ihre Umwandlung in die digitale Form soll hier nicht näher eingegangen werden.

Als weitere Bestimmungsgröße kommt noch die Tankform hinzu, die auch bei zylindrischen Tanks wegen der unvermeidlichen Differenz der einzelnen Querschnitte in verschiedenen Höhen durch Korrekturformeln für jeden Tank eigens berücksichtigt werden muß. Durch Verrechnung dieser Größen kommt man zum wahren Tankinhalt in Gewichtseinheiten, der zur Bilanzierung und zu zollamtlichen Verrechnungen, z. B. zum Ausdrucken, zur Verfügung steht. Die zeitliche Verschiebung bei der Messung der einzelnen Tankinhalte nacheinander ist so klein, daß man auf dem beschriebenen Wege trotzdem zu einer Gesamtbestandsaufnahme kommt. Bei 50 Tanks wäre die Messung des ganzen Tankfeldes in etwa 10 min durchzuführen. Einen Überblick über die gesamte Anlage gibt Bild 6.

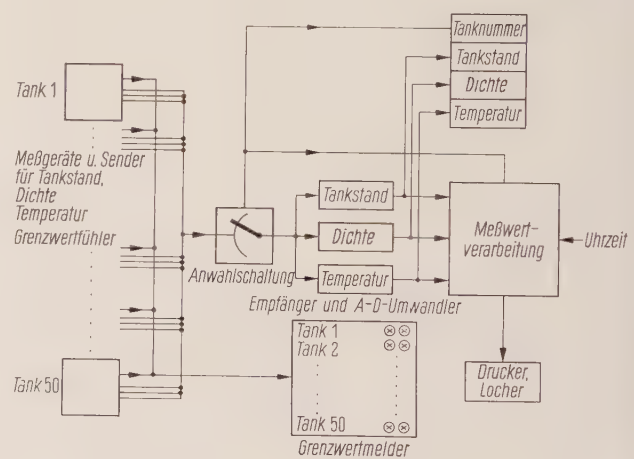


Bild 6 Blockschaltung der Gesamtanlage

Unabhängig von der Messung und Übertragung des Tankstandes arbeitet die Grenzwertkontrolle, die in das Abtastgerät mit eingebaut werden kann. Sie hängt nur von der Funktion des primären Meßgerätes, nicht vom Abtastgerät ab. Einstellbare Grenzwertmarken werden von richtungsabhängigen HF-Grenzwertmeldern abgetastet, und eine Über- oder Unterschreitung des eingestellten Grenzwertes wird über eine direkte Leitung in der Zentrale gemeldet. Bei Ausfall einer Spannung gehen die Grenzwertmelder automatisch auf Alarmstellung.

Send- und Empfangsteil sind weitgehend mit normalen elektrischen Baueinheiten der digitalen Fernmessung und Meßwertverarbeitung des Wernerwerkes für Meßtechnik aufgebaut.

Wirkungsweise und Schaltungstechnik elektrischer Dehnungsmeßstreifen-Manometer

VON KLAUS HORN

Mechanische Druckmeßverfahren

Wie Tafel 1 zeigt, lassen sich bei Druckmessungen sehr viele Aufgaben im Betrieb wie im Laboratorium mit rein mechanisch arbeitenden Meßgeräten [1] lösen. Von Extremfällen abgesehen, können mit den dort aufgeführten Geräten alle praktisch interessierenden Meßbereiche erfaßt und – bei entsprechendem Aufwand – auch hohe Meßgenauigkeiten erreicht werden.


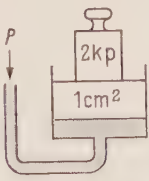
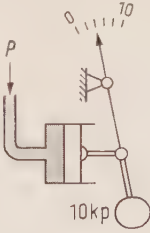
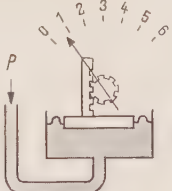
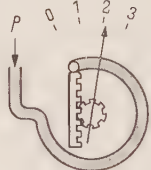
Allen diesen Verfahren ist gemeinsam, daß das Meßergebnis in Form des Ausschlages eines Zeigers oder einer sonstigen Anzeigegröße vorliegt und nur direkt am Meßgerät oder in seiner nächsten Umgebung abgelesen werden kann. Die zur Bildung der Anzeige erforderliche Energie wird dabei dem Meßobjekt entnommen, und der Messung dynamischer Vorgänge ist schon bei verhältnismäßig niedrigen Frequenzen eine obere Grenze gesetzt. Vor allem der Wunsch nach einfacher Fernübertragung und Weiterverarbeitung des Meßwertes führte

daher schon früh dazu, für die Druckmessung auch elektrische Meßverfahren einzusetzen.

Elektrische Druckmeßverfahren

Bei den elektrischen Meßverfahren wird die mechanische Meßgröße Druck ( $P$ ) mit Hilfe von Meßwertgebern zunächst in eine elektrische Größe (Strom, Spannung, Kapazitäts-, Induktivitäts- oder Widerstandsänderung) umgesetzt und dann über ein Verbindungskabel einer angepaßten elektrischen Meßschaltung zugeleitet. In dieser wird die eigentliche Anzeigegröße gebildet und entweder direkt oder über Verstärker an elektrische Anzeige- und Registriergeräte, Drucker, Regler oder meßwertverarbeitende Einrichtungen weitergegeben (Bild 1).

Als Meßwertgeber wurden zunächst Kohledruckmeßdosen [2] eingesetzt, später vor allem induktive und kapazitive Manometer, zu denen dann, unter Verwendung

Hauptsächliches Verwendungsgebiet	Laboratorium		Betrieb		
Meßprinzip					
Meßbereiche	$\approx 10^{-9}$ kp/cm <sup>2</sup> * bis $\approx 10^1$ kp/cm <sup>2</sup>	$\approx 10^{-2}$ kp/cm <sup>2</sup> bis $\approx 10^4$ kp/cm <sup>2</sup>	$\approx 10^{-2}$ kp/cm <sup>2</sup> bis $\approx 10^4$ kp/cm <sup>2</sup>	$\approx 10^{-2}$ kp/cm <sup>2</sup> bis $\approx 10^2$ kp/cm <sup>2</sup>	$\approx 3 \times 10^{-1}$ kp/cm <sup>2</sup> bis $\approx 10^4$ kp/cm <sup>2</sup>
Anzeigefehler	$\approx 5 \times 10^{-4}$ v. E.	$\approx 10^{-4}$ v. S.	$\approx 10^{-3}$ v. S.	$\approx 2 \times 10^{-2}$ v. E.	$\approx 10^{-2}$ v. E.
Bezeichnung	* Macloed-Manometer Flüssigkeits-Manometer	Druckwaage	Kolbendruckmesser	Plattenfederdruckmesser	Rohrfederdruckmesser

Tafel 1 Wichtige mechanische Verfahren für die Druckmessung



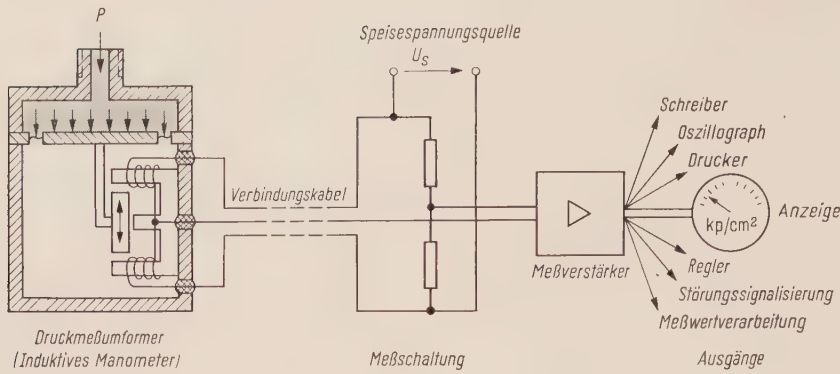


Bild 1 Schema des Aufbaus einer Druckmeßeinrichtung

magnetoelastischer Kraftmeßdosens [3], auch magnetoelastische Manometer kamen.

Der Vorteil elektrischer Druckmeßverfahren, vor allem für die Verfahrenstechnik, liegt auf der Hand. Die in elektrischer Form anfallenden Meßwerte können bequem und praktisch beliebig weit ferngeleitet werden, und eine gleichzeitige Anzeige und Meßwertverarbeitung an mehreren Stellen ist möglich. Auch bei hohen Genauigkeitsforderungen können die Meßwertgeber kleine Abmessungen haben und dabei überlastbar und so robust sein, daß sie keiner Wartung bedürfen. Da sie keinen Reibungsfehlern unterliegen, arbeiten sie ruckfrei, kontinuierlich, was für viele kritische Regelstrecken von großem Vorteil ist. Außerdem sind meist dynamische Messungen bis zu hohen Frequenzen möglich.

Elektrische Manometer mit Dehnungsmeßstreifen haben gerade diese Eigenschaften in besonders hohem Maße. Aufgrund der ständig steigenden Anforderungen an Meßgenauigkeit, Linearität und Stabilität werden sie heute in der Verfahrenstechnik mehr und mehr eingesetzt.

### Aufbau von Manometern mit Dehnungsmeßstreifen

Im allgemeinen bestehen Manometer mit Dehnungsmeßstreifen aus einer Meßfeder, die unter dem Einfluß des zu messenden Druckes elastisch verformt wird. Die hierbei in der Meßfeder hervorgerufenen Materialdehnungen werden Dehnungsmeßstreifen aufgezwungen, die an geeigneten Stellen auf der Oberfläche aufgeklebt sind und deren elektrischer Widerstand sich dadurch proportional der Meßfederdehnung und damit dem zu messenden Druck ändert.

Als Form der Meßfedern für Meßbereiche zwischen etwa 50 und 4000 kp/cm² hat sich wegen seines einfachen, keiner Übersetzung bedürftigen Aufbaues der einseitig geschlossene Hohlzylinder als besonders zweckmäßig erwiesen (Bild 2). Seine Wandungen erfahren unter der Einwirkung des Innendruckes  $P$  Materialdehnungen  $\epsilon$ , die in tangentialer Richtung am größten sind:

$$\epsilon_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_m}{s} \cdot \frac{P}{E} \quad (1)$$

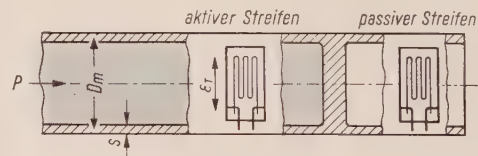
In dieser Richtung werden daher die Dehnungsmeßstreifen aufgeklebt.

Der Dehnungsmeßstreifen wurde Anfang der vierziger Jahre von den Amerikanern RUGE und SIMONS entwickelt und hat sich seitdem als wertvolles Hilfsmittel des Konstrukteurs zur Ermittlung der Beanspruchung von Maschinenteilen bewährt. In seiner bekanntesten Form besteht er aus einer mäandrierenden Wicklung etwa 20 µm starken KONSTANTAN-Drahtes, die in ein geeignetes Trägermaterial,

wie z. B. mit Phenolharzgetränktes Papier, eingebettet ist (Bild 3). Durch zementartige Klebung in innige Berührung mit einem Prüfling gebracht, muß er dessen Dehnungen mitmachen, wodurch der Widerstandsdraht Längenänderungen, gleichzeitig aber auch Änderungen seines Querschnittes und seiner elektrischen Leitfähigkeit, erfährt, was zu den erwähnten Änderungen  $\Delta R$  des elektrischen Widerstandes  $R$  der Wicklung führt. Für KONSTANTAN besteht mit sehr guter Näherung die Beziehung

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot \epsilon \quad (2)$$

Ersetzt man darin  $\epsilon$  durch die Beziehung (1), so erhält



$$\epsilon_T \approx \frac{\sigma_T}{E} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{D_m}{s} \cdot \frac{P}{E} \quad (1)$$

$$\epsilon_a \approx \frac{\sigma_a}{E} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{D_m}{s} \cdot \frac{P}{E} \quad (2)$$

Bild 2 Einseitig geschlossener Hohlzylinder mit dehnungsfreiem Endstück als Meßfeder

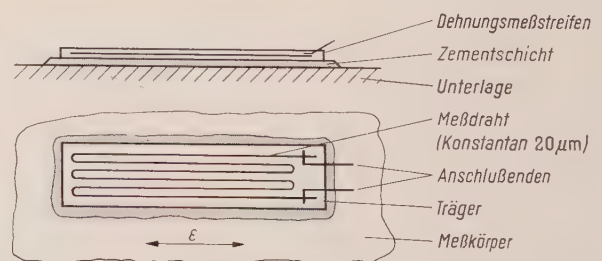


Bild 3 Aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen

man die Umwandlungsbeziehung der Meßfeder

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{D_m}{s E} P \quad (3)$$

Soll diese Umwandlung mit der für Meßwertgeber notwendigen Qualität ablaufen, so müssen mehrere Forderungen erfüllt sein:

1. Die Materialbeanspruchung  $\varepsilon_{Tmax}$  bei Nenndruck  $P_n$  darf nicht zu hoch getrieben werden, um Kriech- und Hystereseerscheinungen sicher zu vermeiden. Praktische Werte liegen bei etwa  $10^{-3}$ .
2. Als Meßfedermaterial kommt nur ein ausgesuchter Spezialstahl mit hervorragenden Elastizitätseigenschaften und hoher mechanischer Festigkeit in Betracht. Hierdurch wird gleichzeitig erreicht, daß die Meßfedern bis zur Annäherung an die Bruchgrenze mehrfach überlastet werden können. Gelegentliche Überlastungen bis 150% Nennlast müssen zulässig sein.
3. Auch bei den Dehnungsmeßstreifen muß man auf hochwertige Ausführungen zurückgreifen und aufwendige Verfahren anwenden, um die Streifen kriech- und hysteresearm und vor allem zeitlich stabil mit der Meßfeder zu verbinden.

Um die Widerstandsänderungen meßtechnisch ausnutzen zu können und um gleichzeitig den Temperatureinfluß auf den Streifenwiderstand zu kompensieren, werden die auf den aktiven Meßfederanteil aufgeklebten »aktiven« Streifen mit »passiven« Streifen zu einer Wheatstonebrücke zusammengeschaltet (Bild 4). Die passiven Streifen sind auf dem über den Abschlußdeckel des Hohlzylinders hinaus verlängerten inaktiven Zylindermantel aufgeklebt, der durch den Meßdruck keinerlei Formänderungen erfährt (s. Bild 2). Da sich alle vier Brückenarme in demselben Temperaturfeld befinden, heben sich temperaturbedingte Widerstandsänderungen der Streifen bezüglich des Brückengleichgewichtes nahezu auf. Resteinflüsse auf den Nullpunkt werden durch einen kleinen, jeweils empirisch bestimmten Kupferwiderstand  $R_T$  eliminiert, der in Bild 4 zu erkennen ist; dieses Bild zeigt auch die vollständige Innenverdrahtung des Meßwertgebers mit allen zugehörigen Abgleich- und Kompensationswiderständen. Darin ist  $r_T$  ein kleiner Nickelwiderstand zum Kompensieren des Temperatureinflusses auf die Empfindlichkeit, der überwiegend von der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls des Meßfedermaterials herrührt. Mit  $r_e$  wird die Empfindlichkeit der Manometer einheitlich so abgeglichen, daß bei Nenndruck  $P_n$  je Volt angelegter Speisepannung  $U_s$  1 mV Meßspannung erzeugt wird.

Damit lautet die Umwandlungsbeziehung für das vollständige Manometer allgemein:

$$\frac{U_m}{U_s} = 1 \text{ (mV/V)} \frac{P}{P_n} \quad (4)$$

Da mit  $r_i$  der Innenwiderstand aller Manometer einheitlich auf 245  $\Omega$  abgeglichen wird, ist sichergestellt, daß

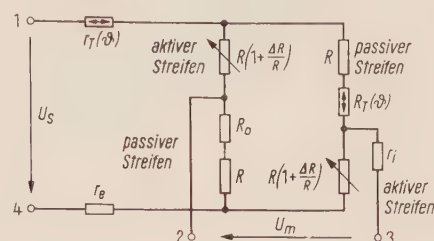
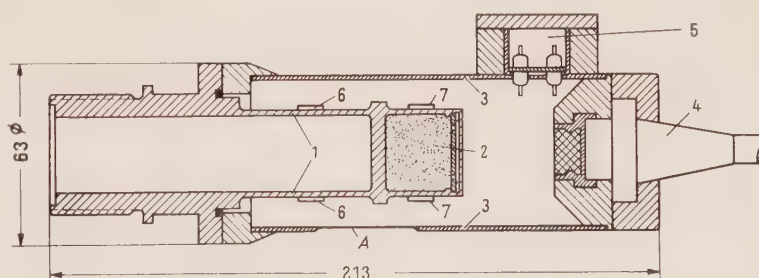


Bild 4 Vollständige Innenschaltung eines Dehnungsmeßstreifen-Manometers mit Abgleich- und Kompensationswiderständen

auch bei Anlagen, bei denen die Ausgangsklemmen 2, 3 (in Bild 4) belastet sind (Ausschlagsverfahren) jederzeit ein Austausch der Manometer ohne Nacheichen möglich ist.

Bild 5 zeigt den Querschnitt durch eines der hier beschriebenen Manometer. Der ganze Raum um die Meßfeder herum ist von einer Schutzkappe hermetisch gegen die Außenatmosphäre abgeschlossen und ist mit Schutzgas gefüllt. Eine Silicagelfüllung verhindert Feuchtigkeitseinflüsse auf die Dehnungsmeßstreifen. Das Schutzgehäuse hat bei A eine Brechsicherung, die aufplatzt, wenn durch unzulässige Überlastungen einmal die Meßfeder reißen und der Innenraum auf den Druck des Meßmediums gelangen sollte.

Das Anschlußkabel wird üblicherweise über einen Spezialstecker axial zugeführt. Um besonderen Betriebsverhältnissen entsprechen zu können, sind aber auch



- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1 Aktiver Teil der Hohlzylinder-Meßfeder | 5 Abgleichkasten für $r_i$ und $r_e$ |
| 2 Inaktiver Teil mit Silicagel-Füllung   | 6 Aktive Dehnungsmeßstreifen         |
| 3 Schutzgehäuse mit Brechsicherung bei A | 7 Inaktive Dehnungsmeßstreifen       |
| 4 Anschlußkabel                          |                                      |

Bild 5 Schnitt durch ein Dehnungsmeßstreifen-Manometer



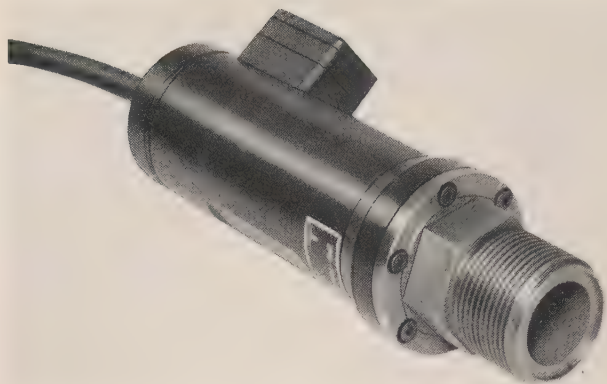


Bild 6 Dehnungsmeßstreifen-Manometer für 50 kp/cm²

Ausführungen lieferbar, bei denen ein Klemmenanschluß mit großen Kriechwegen oder ein Lötanschluß vorgesehen ist und bei denen das Kabel seitlich zugeführt wird.

Bild 6 zeigt das Äußere eines Manometers mit Steckeranschluß für Nenndrücke zwischen 50 und 200 kp/cm². Manometer für verschiedene Nenndrücke unterscheiden sich vor allem durch andere Wandstärken der Hohlzylinder-Meßfeder und oberhalb von 1000 kp/cm² durch ein anderes Anschlußgewinde.

### Eigenschaften der Manometer mit Dehnungsmeßstreifen

Die Meßbereiche sind etwa nach dem Faktor 2 gestaffelt, so daß Manometer für folgende Nenndrücke zur Verfügung stehen:

50, 100, 200, 350, 500, 1000, 2000, 3500 kp/cm².

Jedes Manometer kann bis zu seinem Nenndruck voll ausgelastet werden und ist gelegentlich ohne Schaden bis auf 150% überlastbar. Die Bruchgrenze wird erst bei drei- bis fünffacher Nennlast erreicht. Die Manometer können

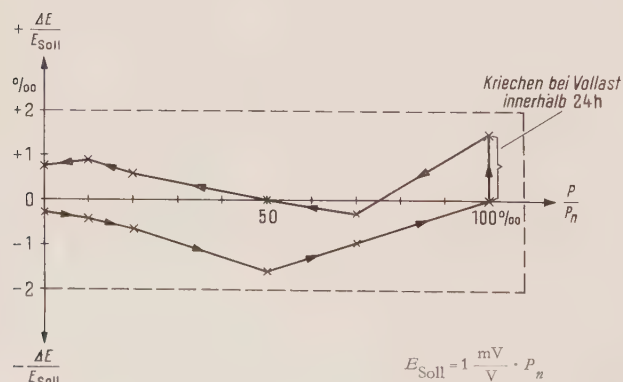


Bild 7 Eichdiagramm eines Dehnungsmeßstreifen-Manometers, Nennbereich 50 kp/cm²

bei Temperaturen zwischen  $-20$  und  $+70^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden und sind im Rahmen ihrer Genauigkeitsklasse normal für den Bereich von  $+20$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  temperaturkompensiert.

In Bild 7 ist das charakteristische Eichdiagramm eines solchen Manometers wiedergegeben, wobei für Auf- und Abwärtsbelastung die Abweichungen von der Sollgeraden aufgetragen wurden. Die Abweichungen blieben auch bei längerer Belastung des Manometers mit Nenndruck innerhalb einer Fehlergrenze von  $\pm 0,2\%$  vom Endwert. In diesem Wert sind also Linearitäts-, Hysteres- und Kriechfehler enthalten!

Für genaue Messungen im Kompensationsverfahren sollte die Speisespannung nicht mehr als 6 V und bei Messungen im Ausschlagsverfahren nicht mehr als 10 V betragen. Damit stehen nach Gleichung (4) bei Nennlast bis zu 6 mV bzw. 10 mV als Meßspannung aus  $245 \Omega$  zur Verfügung. Die Manometer sind für Gleichstromspeisung abgeglichen, können aber ebenso gut auch mit Wechselspannungen gespeist werden und sind daher insbesondere auch für dynamische Messungen in Verbindung mit Trägerfrequenzmeßbrücken geeignet. Ihr Eingangswiderstand zwischen den Klemmen 1 und 4 (in Bild 4) beträgt etwa  $275 \Omega$ .

Die hohe Eigenresonanz der ungedämpften Meßfeder von einigen Kiloherz ermöglicht es, je nach Meßbereich und Meßmedium dynamische Messungen bis zu etwa 1000 Hz durchzuführen.

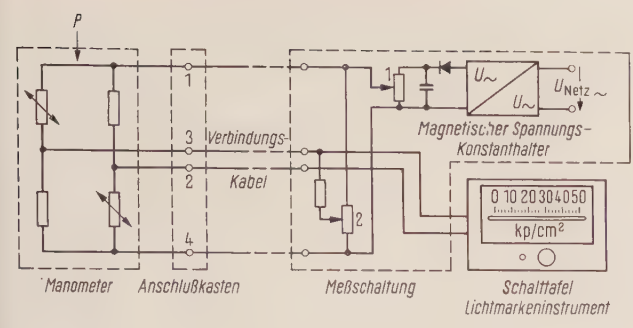
### Elektrische Meßschaltungen [4]

#### Ausschlagsverfahren

Bei geringeren Anforderungen an die Meßgenauigkeit können die elektrischen Manometer in Ausschlagsverfahren eingesetzt werden, die sich durch einen geringen Geräteaufwand auszeichnen. Dabei wird die Speisespannung einem magnetisch stabilisierten Konstanthalter entnommen und im einfachsten Fall die Meßspannung ohne weitere Verstärkung direkt einem Lichtmarken-Einbauminstrument zugeführt.

Aufbau und Aufwand einer solchen Meßanlage, bei der die Meßfehler über alles unter 1% des Endwertes bleiben, lassen sich dem Bild 8 entnehmen.

Sollen jedoch mehrere robuste Schalttafelinstrumente, die auf Wunsch mit elektrischen Grenzwertmeldern zur Störungsüberwachung ausgerüstet werden können, oder Registriergeräte und Regler angesteuert werden, so reicht die Meßleistung der Manometer nicht mehr aus, und man muß einfache Verstärker einsetzen. Je nach geforderter Ausgangsleistung und Ansprechgeschwindigkeit stehen hierfür vor allem Magnetikverstärker oder Transistor-Schwingkreisverstärker zur Verfügung. Sollen bei der Druckmessung auch dynamische Vorgänge miterfaßt werden, so kommen breitbandige Gleichspannungsverstärker oder Trägerfrequenzmeßbrücken in Betracht.



Pot. 1 Speisespannungsabgleich Pot. 2 Nullpunkteinstellung

Bild 8 Elektrische Druckmessung mit Dehnungsmessstreifen-Manometer im Ausschlagsverfahren

### Kompensationsmeßverfahren

Vollständig läßt sich die hohe Meßgenauigkeit der Dehnungsmessstreifen-Manometer erst mit Hilfe von Kompensationsmeßverfahren ausnutzen, die aus betriebstechnischen Gründen zweckmäßigerweise vollautomatisch arbeiten sollten. Bild 9 zeigt eine solche selbsttätig kompensierende Meßschaltung, die besonders für die Verwendung von Kraftmeßdosen und Manometern mit Dehnungsmessstreifen zugeschnitten wurde [5].

Ihre Wirkungsweise besteht darin, daß die Meßspannung  $U_m$  in jedem Augenblick gegen eine Vergleichsspannung  $U_v$  ausgewogen wird, die durch entsprechende Verstimmung einer Kompensationsmeßbrücke erzeugt wird.

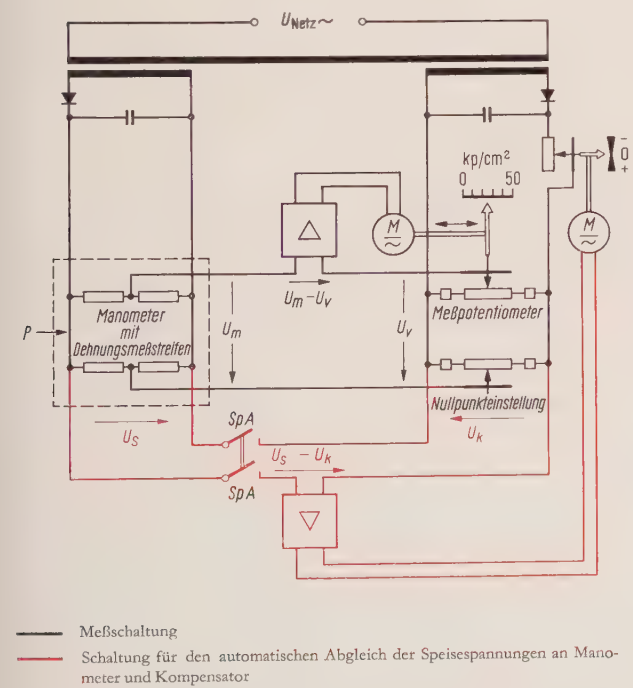


Bild 9 Schaltung für die elektrische Druckmessung mit Dehnungsmessstreifen-Manometer im Kompensationsverfahren mit selbsttätigem Abgleich der Speisespannungen

Jede auftretende Differenz  $U_m - U_v$  setzt vorzeichenrichtig über einen empfindlichen Nullverstärker den Servomotor in Bewegung, der daraufhin den Abgriff des Meßpotentiometers so lange verstellt, bis wieder Gleichheit zwischen  $U_m$  und  $U_v$  besteht. Da  $U_v$  wiederum direkt der Verschiebung des Meßpotentiometerabgriffes proportional ist, ergibt dessen Stellung stets ein genaues Maß für die Größe von  $U_m$  und damit für den zu messenden Druck. Sie läßt sich daher unmittelbar zur Anzeige verwenden. Auf Wunsch können zur weiteren Meßwertverarbeitung noch Folgepotentiometer oder einstellbare Grenzkontakte mit dem Meßpotentiometerabgriff gekuppelt werden.

Für den richtigen Abgleich des automatischen Kompensators ist es nur notwendig, daß das Verhältnis der Speisespannungen von Manometer ( $U_s$ ) und Kompensationsmeßbrücke ( $U_k$ ) konstant bleibt, nicht aber deren absolute Höhe. Aus diesem Grund werden beide Speisespannungen über je eine Sekundärwicklung eines gemeinsamen Netztransformators gewonnen, wodurch sich Netzspannungsschwankungen  $U_k$  und  $U_s$  gleichmäßig mitteilen und sich nicht auf das Verhältnis  $U_s/U_k$  auswirken können. Ändern sich jedoch die Durchlaßwiderstände der Gleichrichter oder die Widerstände der Speisespannungszuleitungen zum Manometer durch Wärmeeinwirkungen, so wird das Verhältnis gestört. Um zu verhindern, daß hierdurch Meßfehler entstehen, wird in ausreichenden Zeitabständen von Hand oder selbsttätig der Kontakt  $SpA$  betätigt und dadurch ein Vergleich der an den Klemmen des Manometers und der Kompensationsbrücke tatsächlich anliegenden Speisespannungen vorgenommen. Bestehen Differenzen, so werden sie über die Kette Nullverstärker, Servomotor und Abgleich-Potentiometer automatisch beseitigt. Die Einheit aus Servomotor und Abgleich-Potentiometer wird mit Leitungswiderstandsabgleich bezeichnet. Seine Schaltung ist in Bild 9 rot herausgehoben.

In der Praxis wird nur ein einziger Nullverstärker eingesetzt, der zum Abgleich der Speisespannungen vom Kompensationsmeßkreis in den Kreis für den Leitungswiderstandsabgleich umgeschaltet wird. Da die Speisespannungen ständig überwacht werden, ist Gleichstromspeisung möglich, ohne daß eine Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit durch Gleichrichteralterungen befürchtet zu werden braucht. Damit ergab sich die Möglichkeit, mit einem Tiefpaß vor dem Nullverstärker alle Störungen auszufiltern, die aus dem Netz (elektrische Maschinen, Starkstromkabel usw.) in die Meßschaltung eingestreut werden.

Durch alle diese Maßnahmen ist erreicht worden, daß sich Druckmeßanlagen nach dem Kompensationsverfahren bauen lassen, bei denen im praktischen Betrieb [5, 6] die Fehler über alles unter 0,3% des Meßbereich-Endwertes bleiben. Darüber hinaus bietet das Kompensationsverfahren noch einige weitere Vorteile:



Die Meßbereiche lassen sich auf etwa den fünffachen Wert spreizen.

Der Nullpunkt kann stark unterdrückt werden (Nullpunkteinstellung s. Bild 9). Bei Verwendung von KOMPENSOGRAPH\*-Punktdruckern können bis zwölf Meßstellen einer Anlage auf einem Streifen registriert werden.

### Anwendungsmöglichkeiten

Die für Betriebsinstrumente ungewöhnlich hohe Meßgenauigkeit der Dehnungsmeßstreifen-Manometer, ferner die kleinen Abmessungen, der widerstandsfähige Aufbau, die zeitliche Konstanz, die hohe Lebensdauer auch bei dynamischen Belastungen und die große Sicherheit in bezug auf mechanische Überlastungen haben diesen Meßwertgebern breite Anwendungsmöglichkeiten gesichert, von denen hier nur die wichtigsten erwähnt sein sollen:

\* Eingetragenes Warenzeichen

Messung, Überwachung und Regelung von Produktionsprozessen in der chemischen Industrie und der Energieerzeugung.

Rationalisierung durch Automation bestehender Produktionsanlagen unter Einsatz der Möglichkeiten der Fernmessung und zentralen Meßwerterfassung.

Statistische und dynamische Druckmessungen in Labor, Prüffeld und Anlage und ferner Überlastungsschutz.

#### Schrifttum

- [1] Mechanische Druckmessung. ATM V 343
- [2] Elektrische Druckmessung. ATM V 132
- [3] Engl, W.: Magnetoelastische Kraftmeßdosen. Siemens-Zeitschrift 29 (1955) 219 bis 222
- [4] Hoppmann, G.: Dehnungsmeßstreifen-Manometer zur Fernmessung des Druckes in einer Pipeline. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 458 bis 460
- [5] Burster, H.: Schaltungstechnik für Geber mit Dehnungsmeßstreifen unter besonderer Berücksichtigung der Forderungen in der Wiegetechnik. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 619 bis 623
- [6] Krützfeld, P.: Erfahrungen mit Dehnungsmeßstreifen-Manometern an großen, fünfstufigen Kolbenkompressoren. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 454 bis 456

## Flüssigkeitszähler mit selbsttätiger Umwertung zur temperaturunabhängigen Mengenzählung

VON WALTER KÄUFLEIN

Volumetrische Flüssigkeitszähler, insbesondere Ringkolbenzähler, werden seit vielen Jahren in der chemischen Technik für die verschiedensten Meßaufgaben verwendet. Sie eignen sich zum fortlaufenden Zählen von Mengen, zum Abfüllen vorbestimmter Flüssigkeitsmengen und nach Ausstattung mit entsprechenden Zusatzeinrichtungen, wie Durchflußgeber und Kontaktwerk, auch als Meßwertgeber für Fernübertragungen und für die verschiedensten Regelaufgaben. Die Ursache für die ständig zunehmende Verbreitung von Ringkolbenzählern dürfte auf mehrere Umstände, wie Einfachheit in Aufbau und Wirkungsweise, Anspruchslosigkeit hinsichtlich Wartung und geringe Anzahl der bereitzuhaltenden Ersatzteile, zurückzuführen sein. Vor allem aber schätzt man die hohe, sich über einen großen Bereich erstreckende und über lange Zeit gleichbleibende Meßgenauigkeit.

In der bisher allgemein bekannten Ausführung messen diese Geräte wie alle Volumenzähler allerdings immer nur das Volumen bei der jeweils herrschenden Betriebstemperatur. Stärkere Temperaturänderungen führen beträchtliche Volumenänderungen mit sich. Diese verfälschen das Meßergebnis, wenn die gezählte Volumeneinheit einem bestimmten Massewert entsprechen muß. Exakte Meßwerte kann man mit den normalen Bauarten der Volumenzähler nur dann erhalten, wenn die Betriebstemperatur nur wenig von der Temperatur abweicht, für die der Zähler justiert ist.

Nun beeinflußt eine Temperaturänderung des Meßgutes nicht nur dessen Volumen, sondern auch dessen Zähigkeit und verändert überdies den Inhalt des Zähler-Meßraums. Die beiden letztgenannten Einflüsse sind durch konstruktive Maßnahmen und durch die Verwendung besonderer Werkstoffe so weit ausgeglichen, daß sie bedeutungslos werden. Es genügt darum, allein die Ausdehnung der Meßflüssigkeit zu betrachten. Der Ausdehnungskoeffizient vieler Flüssigkeiten liegt in den Grenzen von  $50 \cdot 10^{-5}$  bis  $150 \cdot 10^{-5} \text{ grad}^{-1}$ . Das trifft z. B. zu für dünnflüssige Mineralöle, wie handelsübliche Kraftstoffe für Otto- und Dieselmotoren und eine Vielzahl organischer und anorganischer Flüssigkeiten, die in chemischen Fabriken erzeugt und verarbeitet werden.

Setzt man den Mittelwert des Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit mit  $100 \cdot 10^{-5} \text{ grad}^{-1}$  an, so bewirkt eine Temperaturänderung von 1 grad bereits einen Meßfehler von etwa 1 ‰. Wenn an einer Meßstelle größere Temperaturschwankungen auftreten, z. B. durch Witterungseinflüsse bei im Freien aufgestellten Behältern, oder wenn, durch das Verfahren bedingt, verschiedene Temperaturen vorkommen, dann können sich Meßfehler einstellen, die nicht mehr vernachlässigbar sind. An solchen Meßstellen ist es unerlässlich, den Temperatureinfluß auszuschließen.

Mit der Entwicklung eines zusätzlich in den Ringkolbenzähler einzubauenden Getriebes zur selbsttätigen Um-

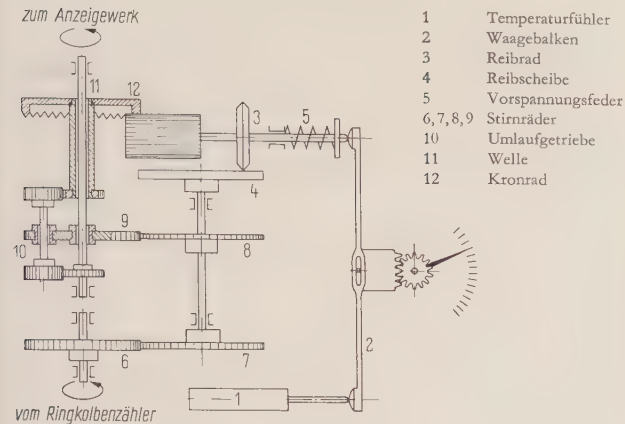


Bild 1 Schema der Einrichtung zur Mengenumwertung für Ringkolbenzähler

wertung des bei Betriebstemperatur gezählten Volumens auf das Volumen bei einer Normaltemperatur ist der aufgestellten Forderung Rechnung getragen worden.

Eine Einrichtung dieser Art, wie sie im Wernerwerk für Meßtechnik entwickelt worden ist, hat grundsätzlich zu enthalten: einen Temperaturfühler zum Messen der Flüssigkeitstemperatur, ein Mittel zum Weiterleiten des Temperaturmeßwertes und ein Organ zum Vermehren oder Vermindern des betriebsmäßigen Mengenwertes auf den Normalwert.

Die hier beschriebene neue Einrichtung zur Mengenumwertung arbeitet völlig selbsttätig. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Verwendung eines stufenlosen Getriebes, in das die unkorrigierten Volumen-Meßwerte als

Drehzahl eingeleitet werden. Eine vom Temperaturfühler bewirkte Verstellung des Getriebes verändert die ausgehende Drehzahl so, daß sie dem korrigierten Volumen entspricht. Bild 1 zeigt die Einrichtung schematisch. Der vom Meßgut umspülte Temperaturfühler 1 ist ein Flüssigkeitsausdehnungsthermometer. Er überträgt seine Längenänderung auf die eine Seite des Waagebalkens 2, dessen Drehpunkt verändert werden kann und an dessen anderer Seite ein Reibradgetriebe mit dem Reibrad 3 und der Reibscheibe 4 angeordnet ist. Die Gegenkraft für den Temperaturfühler wird von der Vorspannungsfeder 5 ausgeübt.

Die vom Ringkolben erzeugte und der Menge proportionale Drehbewegung durchläuft das Getriebe auf zwei verschiedenen Wegen. Der erste führt formschlüssig über die Stirnräder 6, 7, 8, 9 und das Umlaufgetriebe 10 auf die Welle 11, von der aus das Zählwerk angetrieben wird. Der zweite Weg geht von den Stirnrädern 6, 7 über die Reibscheibe 4, das Reibrad 3 und das Kronenrad 12 additiv auf das Umlaufgetriebe 10. In der Welle 11 vereinigen sich beide Wege wieder. Durch Verschieben des Reibrades 3 läßt sich somit die Drehzahl der Welle 11 gezielt verändern.

Diese Anordnung hat den Vorzug, daß der überwiegende Anteil des zu übertragenden Drehmomentes über Zahnräder geleitet wird. Der kraftschlüssige Reibradteil des Getriebes ist mechanisch so gut wie unbelastet.

Das beschriebene Getriebe ist für einen anderen Verwendungszweck schon seit einigen Jahren im praktischen Gebrauch, und zwar wurde es bisher bereits zum Angleich von Ringkolbenzählern an veränderliche Betriebsverhältnisse von Hand verwendet. In der Einrichtung

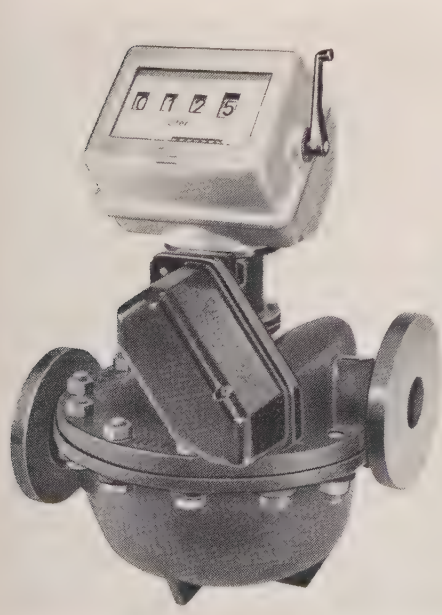


Bild 2  
50-mm-Ringkolbenzähler mit Einrichtung zur Mengenumwertung

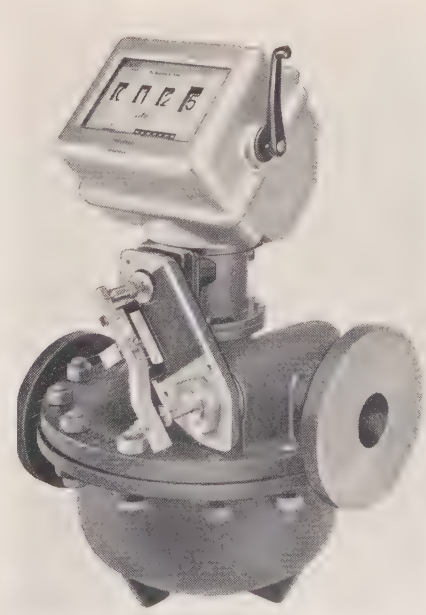


Bild 3  
50-mm-Ringkolbenzähler mit Einrichtung zur Mengenumwertung (Schutzhaube abgenommen)



zur Mengenumwertung verschiebt der Temperaturfühler das Reibrad selbsttätig und ändert damit die Drehbewegung zum Antrieb des Zählwerks so weit, daß jetzt Volumeneinheiten angezeigt werden, die auf eine bestimmte Normaltemperatur reduziert sind.

Die Bilder 2 und 3 zeigen einen vollständigen Ringkolbenzähler mit der Einrichtung zur Mengenumwertung. In Bild 3 ist der Waagebalken zu sehen, an dessen unteren Ende der aus dem Zählergehäuse herausragende Stößel des Temperaturfühlers anliegt. Zum Einstellen des Ausdehnungskoeffizienten der Meßflüssigkeit wird der gleichzeitig als Lager dienende Drehpunkt des Waagebalkens mit Hilfe einer Schraubspindel längs des Schlitzes verschoben. Das Reibradgetriebe ist in einem gesonderten, zwischen Zähler und Anzeigewerk sitzenden Gehäuse untergebracht, in das die am oberen Ende des Waagebalkens anliegende Schubstange hineinführt.

Den Anforderungen der Praxis entsprechend sind die Meßbereiche der Temperaturfühler auf übliche Bezugstemperaturen ausgerichtet; sie umfassen jeweils  $\pm 30^\circ\text{C}$ . Bei diesem Bereichumfang kann in den meisten Fällen die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten der Flüssigkeit von der Temperatur noch als linear angesehen werden (Tafel 1).

Bereich	Betriebstemperaturbereich $^\circ\text{C}$	Bezugstemperatur $^\circ\text{C}$
I	- 10 bis + 50	+ 20
II	+ 20 bis + 80	+ 50
III	+ 50 bis + 110	+ 80

Tafel 1 Betriebstemperaturbereiche und Bezugstemperaturen

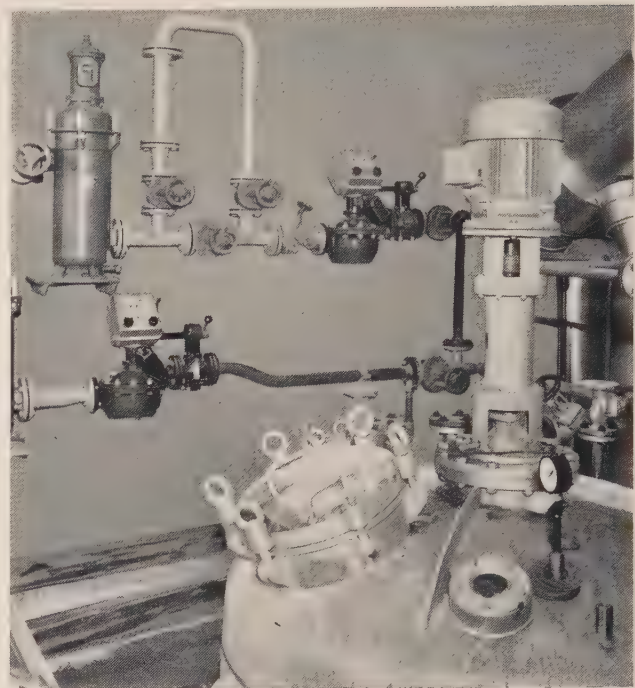


Bild 4 50-mm-Ringkolbenzähler mit Einrichtung zur Mengenumwertung in der Bauart mit Mengeneinstellwerk in einem chemischen Betrieb

Die Einrichtung zur Mengenumwertung ist, wie die anderen Zusatzeinrichtungen zum Ringkolbenzähler, als Baustein ausgebildet und kann daher weitgehend freizügig mit bereits vorhandenen Geräten kombiniert werden. Bild 4 zeigt als Beispiel zwei Ringkolbenzähler mit Mengeneinstellwerk und Absperrventil, die mit der Einrichtung zur Mengenumwertung ausgestattet sind, in einer Anlage der Reichhold-Chemie AG, Hamburg.

## Meß- und Regelanlagen für die Gewinnung von Papierrohstoffen aus einjährigen Pflanzen

VON EBERHARD LIEBLER

Das Verfahren zur Gewinnung von Zellstoff aus Holz durch alkalischen Aufschluß ist schon etwa hundert Jahre alt und ist eine der Grundlagen, auf die sich der Zellstoffexport der nordischen Länder stützt. Die schwindenden Holzreserven einerseits und die nicht ausreichenden Waldbestände andererseits haben in den letzten Jahren verschiedene Länder veranlaßt, sich nach anderen Rohstoffquellen für das so dringend benötigte Papier umzusehen.

So ging zum Beispiel die Vereinigte Arabische Republik daran, eine Anlage erstellen zu lassen, die Reisstroh und

Schilf zu Natronzellstoff oder Halbzellstoff verarbeitet. Wegen des Kieselsäuregehaltes dieser einjährigen Pflanzen kann nur das alkalische Aufschlußverfahren zum Ziele führen. Zur Gewinnung von Strohzellstoff wird das Stroh, nachdem es gehäckselt und von Beimengungen (Erde, Steine) befreit wurde, mit etwa der doppelten Gewichtsmenge Kochlauge 6 bis 7 Stunden lang unter einem Druck von 5 bis 8  $\text{kp}/\text{cm}^2$  gekocht. Die Kochlauge enthält im wesentlichen 8 bis 15% Ätznatron ( $\text{NaOH}$ ) beim reinen Sodaverfahren, wobei auch Abwandlungen in der Zusammensetzung durch Zugabe von Natrium-

sulfid ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) beim Sulfatverfahren vorgenommen werden. Nach dem Kochen wird das Produkt gewaschen, sortiert und anschließend gebleicht und entwässert.

Dementsprechend gliedert sich die gesamte Anlage (Bild 1) in die Häckselei, Kocherei, Wäscherei, Bleicherei und die Chemikalienaufbereitung. Je nachdem, ob Reisstroh oder Schilf verarbeitet werden, treten Verschiedenheiten bei der Behandlung auf. Im allgemeinen erhält man aus Reisstroh eine bessere Zellstoffqualität als aus Schilf. Deshalb wird Schilf oft in einem neutralen Kochverfahren (Neutralsulfitverfahren) zu Halbzellstoff aufgeschlossen. Wegen seines geringeren Aufschlußgrades wird dieser nur als Streckmittel oder, wenn für sich allein, nur zu geringwertigeren Papiersorten weiterverarbeitet.

In der Kocherei sind zehn rotierende Sturzkocher aufgestellt, die mit Sattdampf direkt beheizt werden, der aus zwei Netzen mit verschiedenen Drücken entnommen wird. Zwei schreibende und zählende Durchflußmesser, bei denen mit Hilfe von TELEPERM\*-Rechengeräten die Druckschwankungen eliminiert werden, ermöglichen eine exakte Überwachung des Heizdampfes. Der Heizdampf wird über eine Stopfbuchse zugeführt, die in der Rotationsachse liegt; auf gleiche Weise werden auch die Kocherabgase abgeleitet (Bild 2). Der Heizdampf kann stetig zuströmen; das Entgasungsventil darf dagegen nur in aufrechter Kocherstellung geöffnet werden, da sonst Kochflüssigkeit austreten würde. Eine Steuerscheibe, die mit dem Kocherantrieb gekoppelt ist, stellt dies sicher. Die gesamte Anlage ist ausschließlich mit Regelgeräten des TELEPNEU\*-Systems bestückt, da sich der Wunsch des Kunden nach einheitlichen austauschbaren Geräten nur durch ein Bausteinsystem verwirklichen läßt, wie es das TELEPERM-TELEPNEU-System darstellt. Alle elektrisch anfallenden Meßgrößen (z. B. Temperatur und pH-Wert) müssen deshalb in einen entsprechenden Luftdruck umgesetzt werden.

Das Kochen setzt einen reproduzierbaren Gradienten des Temperaturanstieges voraus. Deshalb wird der Sollwert dem Temperaturregler vom Zeitplangeber vorgegeben. Ein Entgasungsregler hält den im Kocherraum herrschenden Druck immer auf dem Sattdampfdruck.

Zur Darstellung dieses mit der Temperatur stetig veränderlichen Sattdampfdruckes wird ein Dampfspannungsfühler benutzt, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, deren Sattdampfdruck dem der Kochflüssigkeit entspricht. Mit Hilfe eines TELEPNEU-Meßumformers wird diese Meßgröße in einen Druck des normierten Bereiches 0,2 bis 1  $\text{kp/cm}^2$  übersetzt. Der Sattdampfdruck wird über ein pneumatisches Verhältnissglied ständig mit dem tatsächlich im Kocher vorhandenen Druck verglichen und von dem Regler auf konstantem Verhältnis gehalten.

Nach Beendigung des Kochens nehmen zwei Blastanks das aufgeschlossene Kochgut auf. Aus diesen gelangt es

nach Einstellung auf eine bestimmte Konzentration in die Wäscherei. Zur Dichtemessung wird die mechanische Arbeitsleistung eines im Blastank befindlichen Rührwerks herangezogen. Die elektrische Leistungsaufnahme des Antriebsmotors wird dazu von einem Wirkleistungs-

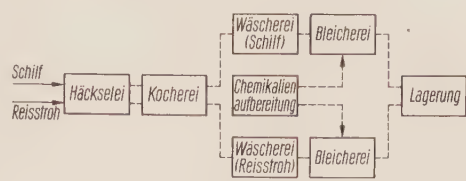


Bild 1 Schema einer Anlage zum Gewinnen von Zellstoff aus einjährigen Pflanzen

meßumformer in einen verhältnissgleichen eingepprägten Gleichstrom umgesetzt und über einen elektro-pneumatischen Umsetzer als Istwert einem TELEPNEU-Regler zugeführt, der die Dichte des angefallenen Zellstoffes konstant hält. Hierzu wird dieser mit Waschlauge aus der Wäscherei verdünnt. Voraussetzungen für Dichtemessungen aufgrund der Rührmethode sind, daß die Reibung der Stoffdichte eindeutig zugeordnet ist und daß das Rührwerkgetriebe keinen Schlag aufweist.

In der Wäscherei wird der Zellstoff an Saugzellenwaschfiltern von den noch vorhandenen Kochlauerückständen befreit. Die Durchflußmessung wird in bekannter Weise mit doppelkonischen Venturirohren vorgenommen, bei denen zur einwandfreien Druckentnahme Spülungen beider Wirkdruckleitungen vorgesehen sind.

Ein TELEPERM-Meßumformer liefert bereits einen linearen Wert des Durchflusses. Der Durchfluß des in die Wäscherei kommenden Zellstoffes wird, um eine gleichmäßige Belastung der Saugzellenfilter zu erzielen, gere-

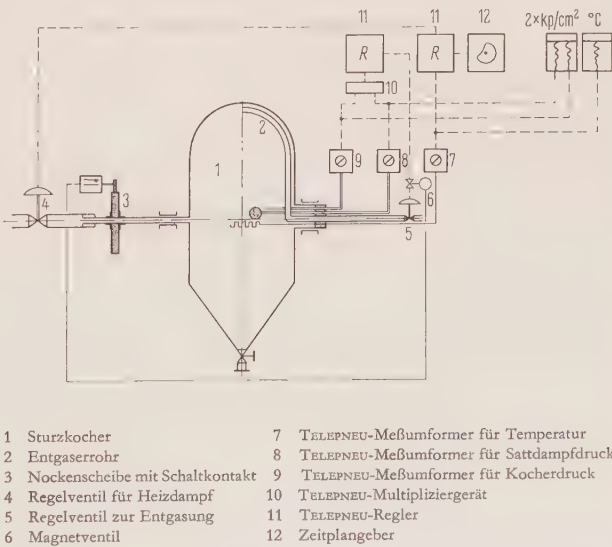


Bild 2 Regelschema für einen Sturzkocher

\* Eingetragenes Warenzeichen



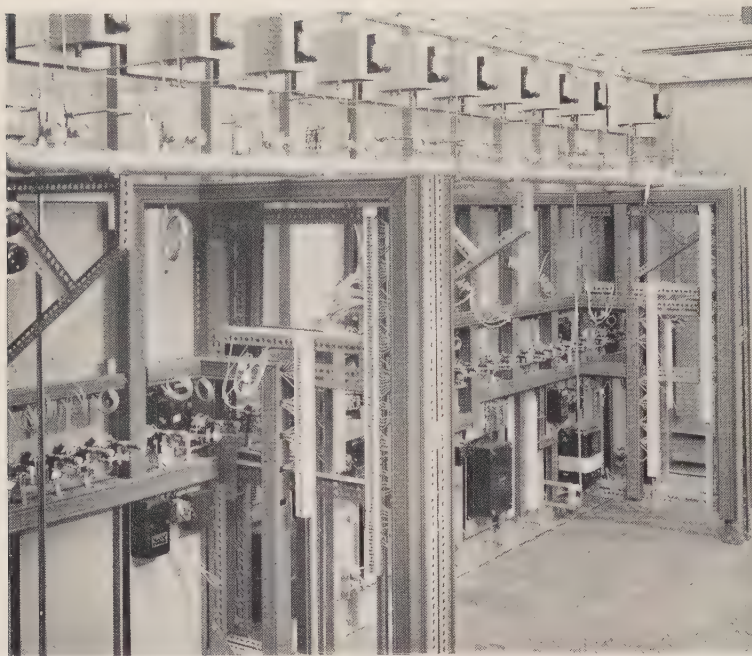


Bild 3 Rückseite der Tafeln für die Warte der Bleicherei eines Zellstoffwerkes

gelt. Ein weiterer Regler verdünnt den Zellstoff in einem einstellbaren Verhältnis mit Dünnlauge.

In jeder weiteren Stufe der Zellenfilter nimmt die Konzentration der als Spülmittel verwendeten Lauge so weit ab, daß zum Schluß mit Warmwasser gespült wird, dessen Durchfluß und Temperatur registriert werden. Eine Bütte nimmt den gewaschenen Zellstoff auf, aus dieser wird er dann über Jönsson-Sortierer (Zentrifugal-Sortierer) in eine Sammelbütte für sortierten Zellstoff überführt.

Je nachdem, ob es sich um Zellstoff aus Reisstroh oder aus Schilf handelt, wird beim Waschen verschieden verfahren:

Bei Schilfzellstoff ist der Aufwand von Saugzellenfiltern und Sortierern etwas geringer, die Wirkungsweise jedoch die gleiche. Diese Verschiedenheit der Behandlung setzt sich auch beim nachfolgenden Prozeß, dem Bleichen, fort. Dieses dient dazu, den mehr oder weniger bräunlichen Farbton des ungebleichten Zellstoffes zu entfernen. Durch Chlorierung müssen dann die farbgebenden Substanzen, zum Beispiel Ligninreste, entfernt werden, wobei darauf Wert gelegt wird, die Faser möglichst wenig zu schädigen. Durch Unterteilen der Bleiche in mehrere Stufen läßt sich der Weißgehalt beträchtlich erhöhen unter gleichzeitiger Schonung der Faser und bei verhältnismäßig niedrigem Bleichmittelverbrauch.

Zunächst wird der Stoff mit elementarem Chlor in einem zweiteiligen Chlorierungsturm behandelt. Mit einem Zellenradzuteiler wird ein konstanter Durchfluß des Zellstoffes erzielt. Der Durchfluß des hinzutretenden

Chlors wird durch Blende mit Meßstrecke und TELEPERM-Durchflußmeßumformer ermittelt, wobei ein nachgeschaltetes TELEPERM-Rechenggerät den Einfluß der Druckschwankungen ausschaltet.

Nachdem der Zellstoff in einem Waschfilter von den Oxydationsprodukten und dem Restchlor befreit ist, gelangt er in einen Alkaliturm. In einem Mischer wird er vorher unter Zugabe von Dampf und Natronlauge homogenisiert, bevor man die Alkalien im Alkaliturm auf ihn einwirken läßt. Die Temperatur in verschiedenen Höhen des Alkaliturms wird mit mehreren, in verschiedener Höhe des Turms eingebauten Widerstandsthermometern überwacht. Der Höhenstand wird wie beim Chlorierungsturm durch Erfassen des statischen Druckes gemessen. In einem nachfolgenden Waschfilter werden die Alkalireste entfernt, und in einem Mischer wird der Stoff mit Hypochlorit-Bleichlauge versetzt, in gleicher Weise wie es beim Alkaliturm geschieht.

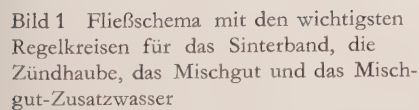
Bevor die abschließende Bleiche im Dünnstoff-Hypochloritturm vor sich geht, wird der pH-Wert des Stoffes überwacht, was durch Glaselektroden mit Verstärker geschieht. Die pH-Messung bei der Zellstoffbleiche ist deshalb so wichtig, weil hierbei die Schädigung der Faser beim Neutralpunkt am geringsten ist.

Beim Schilfzellstoff wird die Bleiche etwas vereinfacht, indem der Dünnstoff-Hypochloritturm nicht in Anspruch genommen wird. Von den verschiedenen Nebenbetrieben zum Erzeugen der Hilfsstoffe ist vor allem die Bleichlaugeaufbereitung erwähnenswert. Als Bleichmittel dient Calciumhypochlorit, das dort aus seinen beiden Komponenten Kalkmilch und Chlor erzeugt wird. Während sich die Überwachung der Kalkmilchbehälter auf eine reine Höhenstandmessung beschränkt, ist beim Chlorbehälter ein größerer Aufwand notwendig, der sich aus der Aggressivität und der Gefährlichkeit des Chlors ergibt. Hier wird die Füllmenge durch Messen der Auflagerkräfte mit Hilfe magnetoelastischer Kraftmeßdosen ermittelt. Diese Art der Inhaltsmessung hat sich bei allen geschlossenen Behältern mit verflüssigten Gasen durchgesetzt, da sie vom Aggregatzustand des Mediums unabhängig ist. Zusätzlich wurde eine Signalisierung des Druckes im Chlorbehälter vorgesehen. Abhängig vom Höhenstand im Hypochloritbehälter wird das Kalkmilchventil geöffnet. Da normale Regelventile für Kalkmilch wegen der Verstopfungsgefahr ungeeignet sind, werden gummierte Membranventile mit TELEPNEU-Stellantrieb hierfür eingesetzt. Bei der Hypochloritbildung soll ein bestimmtes Redoxpotential eingehalten

Leitgeräte, Anzeiger und Schreiber für alle zum Betrieb wichtigen Größen sind in Warten zusammengefaßt, die unter Anwendung von Fließbildern eine übersichtliche Darstellung des Verfahrens ermöglichen. Bild 3 zeigt die Rückseite von Tafeln für solche Warten, fertig verdrahtet und installiert.

## VON MATTHIAS NIEVELSTEIN

Die Eisen- und Stahlerzeugung der Welt ist in den letzten Jahrzehnten ständig gestiegen. Dementsprechend hat





auch der Bedarf an Eisenerzen zugenommen. Ein erheblicher Teil der Eisenerze fällt, überwiegend bedingt durch die angewandten Aufbereitungsverfahren, als Feinerz an, dessen Verhüttung beim heutigen Stand der Technik erst durch die Sinterung, d. h. durch Überführung in stückige Form, ermöglicht wird. Die Leistungsfähigkeit der Hochöfen wächst mit einem steigenden Anteil gesinterter Erze in der Beschickung. Darüber hinaus wird Koks eingespart. Die Chargierung der Hochöfen mit »selbstgängigem« Sintermüller, einem Möller, der aus der gesinterten Mischung von Erz und den erforderlichen Zuschlagstoffen besteht, bringt weitere Vorteile.

In einer Sinteranlage wird aus einer Vielzahl von Erzkomponenten ein physikalisch und chemisch einheitlich aufgebautes Beschickungsgut für den Hochofen geschaffen, der Sinter. Die verschiedenen Erzsor ten befinden sich in Bunkern und werden dort im gewünschten Verhältnis von automatischen Bandwaagen ausgetragen, in Mischtrommeln gemischt und durch Wasserzusatz gekrümelt, um die Luftdurchlässigkeit zu vergrößern. Diese Mischung wird dann der eigentlichen Sintermaschine zugeführt, die nach Art eines Wanderrostes kontinuierlich die Erz Mischung aufnimmt und sie, nachdem der Koks in der Sintermischung gezündet ist, während des Transportes zum Abwurfende in Sinter verwandelt. Die Sinterung ist ein thermisches Verfahren, bei dem der Brennstoffgehalt der Mischung durch hindurchströmende Luft nach anfänglicher Zündung verbrannt wird, wobei die Erze bis auf Schmelztemperaturen erhitzt und die einzelnen Körnchen aneinandergeschweißt werden [1].

Das Band der »Sintermaschine« [2] führt das Sintergut mit einer Geschwindigkeit von 0,8 bis 5 m/min unter einer »Zündhaube« hinweg. Unter dieser entzündet sich der Koks in der Sintermischung (s. Bild 1). Es entstehen Temperaturen von 1000 bis 1200 °C, die den Sintervorgang einleiten. Ein Absauggebläse saugt die notwendige Verbrennungsluft auf der ganzen Länge des Sinterbandes durch das Sintergut und durch eine größere Anzahl von Saugkästen nach unten hin ab.

Unter der Wirkung der hinzutretenden Luft zündet die Sintermischung an der Zündhaube zunächst in der oberen Lage. Die Saugwirkung des Gebläses verlagert dann die Brenn- und Sinterzone immer mehr nach unten, und die obere Schicht, die bereits gesintert ist, kühlt sich ab. Die Brennzone erreicht schließlich den Rostbelag, eine etwa 2 cm hohe Rückgut-Schicht größerer Körnung, die die Roststäbe vor dem Verschlacken und Schmelzen schützt.

Der fertige Sinter wird abgesiebt, wobei die feinen Teile als Rückgut in die Mischung zurückgehen, während die Körnungen über 15 oder 25 mm üblicherweise nach einer besonderen Kühlung den Hochöfen zugeführt werden [3].

## Wege zur vollständigen Automatisierung von Sinteranlagen

Die Automatisierung von Sinteranlagen hat in neuester Zeit beachtliche Fortschritte gemacht [4]. Das Ziel dieser Entwicklung ist, einen Betriebsablauf aufrechtzuerhalten, der von subjektiven Einflüssen weitgehend frei ist und weniger Arbeitskräfte erfordert. Die Erzeugung soll so hoch wie möglich, die Sinterqualität gleichmäßig und gut sein.

Voraussetzung für die Regelung der Sintermaschine sind genaue, zuverlässige Meßergebnisse; diese müssen auch unter den rauen Betriebsbedingungen sichergestellt sein. Staub, Wasser, Wärme und Erschütterungen dürfen die Wirkungsweise der Gebergeräte am Meßort nicht beeinträchtigen. Hieraus erwächst die Forderung nach robusten, gußgekapselten Gebergeräten, die sich in Hüttenbetrieben bewährt haben.

Aus der Betriebsweise der Sintermaschine ergeben sich vier Regelaufgaben (s. Bild 1):

1. Regelung der Bandgeschwindigkeit
2. Regelung der Zündhaube
3. Regelung des Mischgutes
4. Regelung des Wasserzusatzes

### Sinterband

Die Abgastemperatur in den Saugkästen unterhalb des Sinterbandes ist ein Maß für die Sinterbett-Temperatur. Ihre Höhe richtet sich nach der Schichtdicke des noch nicht gesinterten Mischgutes. In den ersten Kästen, nahe der Zündhaube, ist die Temperatur verhältnismäßig niedrig, da die Verbrennungswärme aus der oberen Brennschicht von den unteren Mischgutlagen aufgenommen wird. Über die Länge des Sinterbandes, die 50 m und auch mehr betragen kann, steigt die Temperatur stetig an (Bild 2). Im vorletzten Kasten ( $m$ ) erreicht sie ihr Maximum. Zum letzten Kasten ( $n$ ) hin fällt sie ab, wie es ein einwandfreier Prozeßverlauf erfordert.

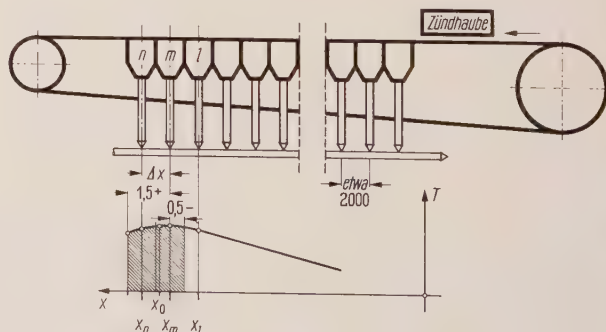


Bild 2 Maximumtemperatur am vorletzten Saugkasten ( $m$ ) des Sinterbandes

Liegt das Temperaturmaximum nicht in  $m$ , sondern davor im Kasten  $l$ , so wird der Sintervorgang vorzeitig beendet sein. Die Brennschicht erreicht den Rost zu früh. Die Leistungsfähigkeit der Sintermaschine ist nicht mehr voll ausgenutzt. Liegt dagegen das Maximum in Höhe von  $n$ , so ist das Mischgut noch nicht völlig gesintert. Das ausgetragene Sinterprodukt hat nicht den Härtegrad, der für die Verhüttung im Hochofen günstig ist und angestrebt werden muß. Zudem sind aller Voraussicht nach die Porigkeit und die Reduzierbarkeit des Sinters unzureichend.

Mißt man die Abgastemperaturen  $T_l$ ,  $T_m$  und  $T_n$  in den Saugkästen, so kann man mit elektronischen Rechengerten die Differenztemperaturen  $(T_m - T_l)$  und  $(T_m - T_n)$  bilden und für die Stelle des Sinterband-Saugkastens, an der das Temperaturmaximum liegen soll, in genügender Annäherung ermitteln:

$$x_0 \approx x_m - \frac{\Delta x}{2} + \Delta x \frac{T_m - T_l}{(T_m - T_l) + (T_m - T_n)} \tag{1}$$

$$\frac{x_0 - x_m}{\Delta x} \approx \frac{T_m - T_l}{(T_m - T_l) + (T_m - T_n)} - 0,5 \tag{2}$$

$$\approx f(T) - 0,5 \tag{3}$$

$x_0$  ist die Stelle, an der das Temperaturmaximum durch den Rechner ermittelt wird,  $x_m$  die des Sinterband-Saugkastens  $m$  und  $\Delta x$  der Abstand der Sinterband-Saugkästen untereinander.

Nach den Gleichungen (1) und (2) ist  $x_0$  eine Funktion des Quotienten, der aus der Temperaturdifferenz  $(T_m - T_l)$  und der Summe der Temperaturdifferenzen  $(T_m - T_l) + (T_m - T_n)$  gebildet wird (Bild 3).

Für den beschränkten Bereich:

$$(x_m - 0,5) < x_0 (< x_m + 1,5)$$

ist der Funktionsverlauf in Bild 4 dargestellt. Für weitere Bereiche ist die Näherungsgleichung zu ungenau.

Die Temperaturen in den Saugkästen werden mit Mantelthermoelementen gemessen, die als Einfach-, Zweifach- und Dreifachelemente aus Eisen-KONSTANTAN-Thermopaaren in Spezial-Schutzrohren stecken und im Boden des Schutzrohres hart eingelötet sind. Für den Einbau an der Saugkasten-Wandung (Bild 5) werden mit Vorteil Keilverschlüsse verwendet, die sich mit einem leichten Hammerschlag schnell öffnen lassen [5]. Konus und Gegenkonus dichten gegen den Hinzutritt von Außenluft ab.

Bild 6 zeigt im einzelnen die Anordnung der Regelkreise für die Geschwindigkeitsregelung des Bandes. Die Meßumformer  $a$ ,  $b$  und  $c$ , der Rechner, die Sollwertsteller,

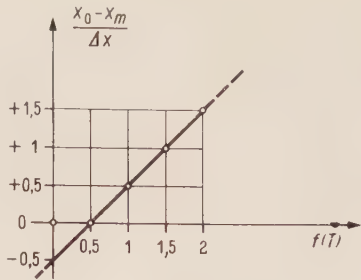


Bild 3 Der Quotient  $\frac{T_m - T_l}{(T_m - T_l) + (T_m - T_n)}$  aus Gleichung (2) ist bestimmend für die Lage des Temperaturmaximums

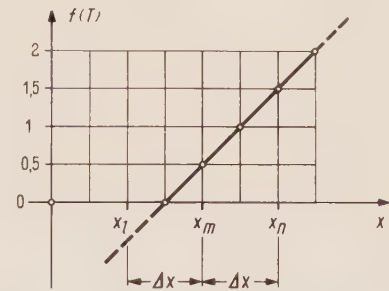


Bild 4 Sinterband-Bereich  $(x_m - 0,5) < x_0 < (x_m + 1,5)$  nach Gleichung (2)

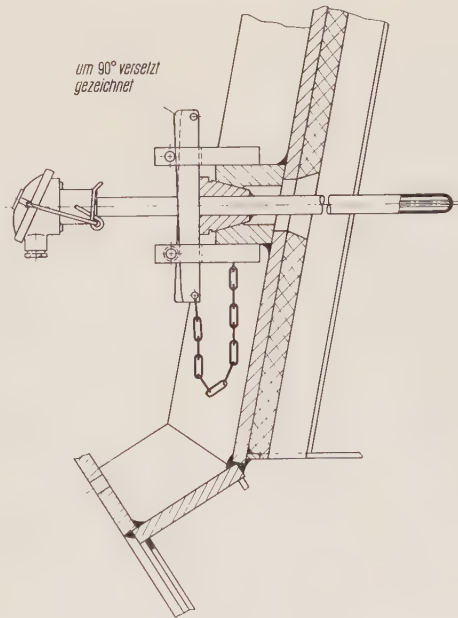


Bild 5 Dreifach-Mantel-Thermoelement in Sonderausführung für Saugkästen von Sintermaschinen mit Konus-Dichtung und Keilverschluß



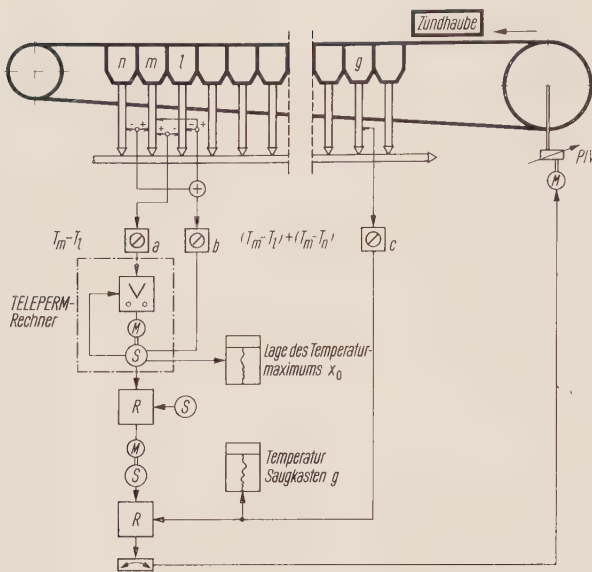


Bild 6 Anordnung der Meß- und Regelgeräte zum Aufzeichnen und Regeln der Maximumtemperatur

Regler und Leitgeräte für Regelung und Fernsteuerung sind Bausteine des TELEPERM-Systems [6, 7, 8].

Der Rechner bestimmt aufgrund des Temperaturverlaufes über den Sinterbandsaugkästen  $l$ ,  $m$  und  $n$  (Meßumformer  $a$ ,  $b$ ) die Scheiteltgleichung einer durch diese drei Punkte gelegten Parabelnäherung. Das Rechenergebnis

bleibt auch dann eindeutig, wenn das Maximum außerhalb des Gültigkeitsbereiches liegt, ganz gleich, wie die Kurve entartet (konvex oder konkav gekrümmt, Entartung in eine Gerade oder im Sonderfall in eine Wendetangente). Der Rechner liefert den Istwert der Lage des Temperaturmaximums, das mit dem Sollwert verglichen wird. Ein Regler führt mit seiner Ausgangsgröße den Sollwert eines Temperaturreglers. Die Regelgröße (Meßumformer  $c$ ) dieses Reglers ist eine Sinterbandsaugkasten-Temperatur, gemessen bis etwa zwei Drittel der Saugkastenanzahl, von der Aufgabe des Sintergutes her gerechnet (z. B. Saugkasten  $g$ ). Die Stellgröße dieses Temperaturreglers ist die Drehzahl des Sinterbandes.

### Zündhaube

Die Überwachung und Regelung beschränkt sich bisher auf das Luft-Brennstoff-Verhältnis. Führend ist die Luft. Ihr Sollwert ist einstellbar. Den Brennstoff – meist Hochofengas – läßt man mit einem Verhältnisregler nachfolgen. Luftdurchfluß und Luft-Brennstoff-Verhältnis stellt der Maschinist nach der Temperatur in der Zündhaube ein. Es wird noch erprobt, ob die Temperaturmessung mit Gesamtstrahlungs-pyrometern Ergebnisse liefert, die auf die Dauer brauchbar sind und die in einer Kaskadenschaltung (vgl. Bild 1) zur Regelung herangezogen werden können.

### Mischgut

In der Sintermaschine ist die Bandgeschwindigkeit mit dem An- und Abtransport des Sintermaterials, mit den

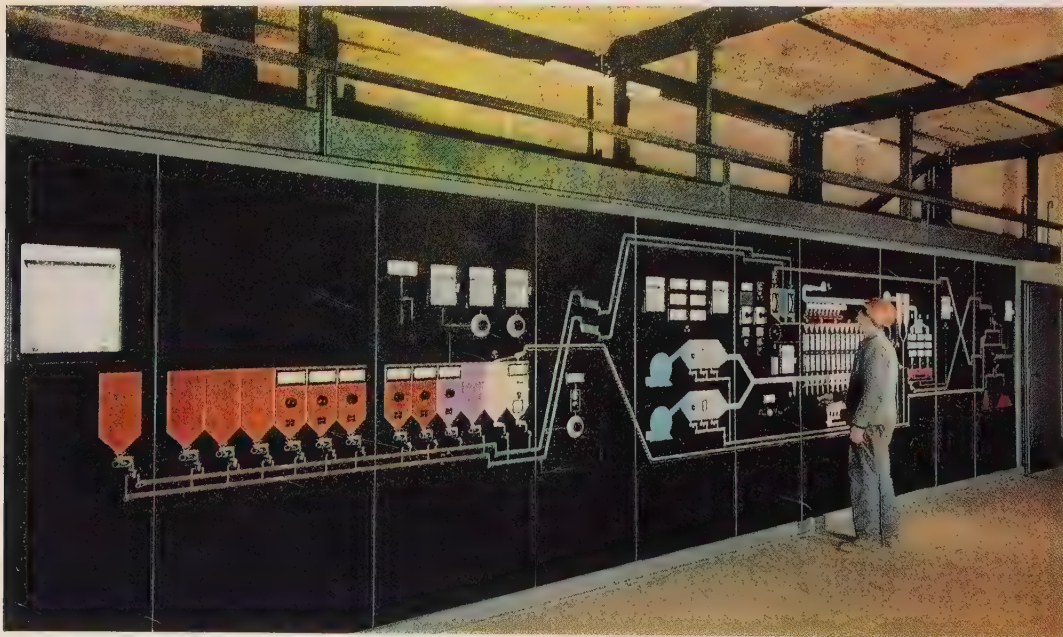


Bild 7 Leuchtwaite einer Band-Sinteranlage mit Steuerschaltern und TELEPERM-Sollwertstellern für die Regelung der Bandgeschwindigkeit. (Dillinger Hüttenwerke)

Mischvorgängen in Misch- und Rolltrommeln und mit der Befeuchtung des Mischgutes aufs engste verknüpft. Kopplungsglieder sind die verschiedenen Regelkreise, die in Regler-Kaskaden einen Vorgang vom anderen abhängig machen. Eine allzu starre Verbindung ist unerwünscht. Hand-Sollwertsteller und Leitgeräte müssen es dem Maschinisten möglich machen, einzugreifen (Bild 7) und zu ändern, wann immer es ihm notwendig erscheint.

Vor dem Mischen lagern Erze, Zuschläge, Kalk, Sinter-Rückgut und Koks in den Vorratsbunkern der Sinteranlage. Wenn die Zusammensetzung des Möllers festliegt, werden die Gewichte der einzelnen Komponenten an den automatischen Waagen der Bunker eingestellt. Das ausgetragene Gut jedes Bunkers wird als Festwert geregelt. Voraussetzung für die gleichmäßige Entnahme ist, daß sich am Bunkerausgang keine Stauungen ergeben. Wird der stetige Materialfluß durch Materialbrücken, die sich festsetzen wollen, unterbrochen, so schalten die Bandwaagen automatisch Schwingmundstücke ein. Durch das schnelle Hin- und Herbewegen der Mundstücke wird die Stauung aufgehoben. Das an den Wandungen klebende Material wird abgeschüttelt.

Mit einer weiteren elektronischen Bandwaage wird die Summe aller Erze und Zuschläge gemessen. Man erhält das Gewicht je Meter Transportband. Ein Meßumformer wandelt das Meßergebnis in einen eingepprägten Gleichstrom um. Ebenso ist es bei der Bandgeschwindigkeit. Durch Multiplizieren erhält man das Fördergewicht des Bandes je Stunde. Kalk, Koks und Rückgut werden zum Gesamterzgewicht mit zusätzlichen Reglern im gewünschten und einstellbaren Prozentsatz hinzugegeben.

Das Band fördert die Mischung zur Misch- und Rolltrommel (vgl. Bild 1) und zu den Mischgut-Vorrats- und Aufgabebältern. Zum Feststellen der Behälterinhalte werden Kraftmeßdosen [9, 10] verwendet. Die Gewichte der Behälterinhalte werden angezeigt und als Korrekturwerte von den Regelkreisen der Mischgutförderanlage aufgenommen.

## Wasserzusatz

Es wird kaum gelingen, die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Mischgutes vollkommen konstant zu halten, obwohl die Gewichte der einzelnen Komponenten mit ausreichender Genauigkeit gemessen und geregelt werden. Trotz der Behandlung in Misch- und Rolltrommeln kann die Kornverteilung unterschiedlich sein. Besonders störend wirkt sich eine unterschiedliche Feuchte des Mischgutes auf den Sinterprozeß aus. Nasses Erz verlangt einen größeren Zusatz Koks als trockenes. Auch der Kalkbedarf wird ein anderer.

Bei dem heutigen Entwicklungsstand hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Wasserzusatz nach dem Mischgutgewicht zu regeln (Bild 8). Die elektrische Ausgangsgröße einer Bandwaage wird mit einem Meßumformer in einen eingepprägten Gleichstrom umgeformt. Verwendet man bei der Durchflußmessung für das Zusatzwasser ebenfalls elektrische Meßumformer, so lassen sich das Mischgutgewicht und der Wasserdurchfluß mit einem Verhältnisregler vergleichen und regeln. Treten Regelabweichungen auf, so vergrößert oder verkleinert der Verhältnisregler den Wasserdurchfluß über das Regelventil. Ein Sollwertsteller gibt dem Betriebspersonal die Möglichkeit, das Mischgut-Wasser-Verhältnis dem Bedarf anzupassen.

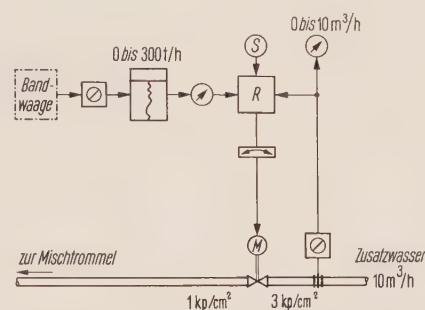


Bild 8 Wirkschema für die Regelung des Wasserzusatzes zum Mischgut

Neue Hochofenanlagen werden voraussichtlich in zunehmendem Maße für »selbstgängigen« Sinter\* und Bandbegichtung eingerichtet werden. Die vollständige Beschickung ausschließlich mit Sinter und mit Koks über Gummitransportbänder hat sich in einzelnen Werken bewährt. Hand in Hand mit dieser Entwicklung geht das Bestreben nach einer noch weitergehenden Automatisierung des gesamten Betriebes.

## Schrifttum

- [1] Luyken, W.: Die Vorbereitung des Hochofenmöllers. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953
- [2] Wendeborn, H. B.: Sintering as a Physical Process. J. Iron a Steel Inst. **175** (1953) 280 bis 288
- [3] Kosmider, H., Bertram, E. und Schenk, H.: Untersuchungen zur Ermittlung des günstigsten Feuchtigkeits- und Brennstoffgehaltes von Feinerzmischungen für Sinterung. Stahl und Eisen **76** (1956) 858 bis 870
- [4] Wendeborn, H.: Die Bedeutung des Sinterverfahrens für die Hochofenproduktion. Metallgesellschaft AG. Mitt. aus d. Arbeitsbereich (1959) 3 bis 12
- [5] Liesegang, W.: Thermoelemente im Hochofenwerk. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 664
- [6] Kühler, A. und Sartorius, H.: Drei Jahre TELEPERM-TELEPNEU-System. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 551 bis 555
- [7] Fuchs, K.: Ein neues Meß- und Regelsystem für die wärmetechnische Verfahrenstechnik. Gaswärme **9** (1960) 76 bis 85
- [8] Schlick, K.: TELEPERM-Zeitglied und elektromechanischer TELEPERM-Rechner. Regelungstechnik **8** (1960) 270 bis 273
- [9] Engl, W.: Mechanische Probleme bei elektrischen Kraftmeßdosen. ATM (1960) R 13 bis R 17
- [10] Oemigk, J.: The Application of Electrical Load Cells. Siemens-Review XXVII (1960) 260 bis 263

\* Das Mischgut und der Sinter enthalten die gesamten Zuschläge, besonders auch die Kalkmenge, die zur Bildung der Hochofenschlacke notwendig ist.



## Regelung einer Walzenringmühle für Rohmehl mit Geräten des TELEPERM-Systems

VON GERT ALLERS UND JOACHIM HAMMER

Die wesentlichen Rohstoffe zum Herstellen von Zementklinker im Drehofen mit Wärmeaustauscher [1] sind tonhaltiger Kalkstein (Kalkmergel,  $\text{CaCO}_3$ -Anteil etwa 73%) und Zusatz-Kalkstein mit 97%  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt. Beide Komponenten gelangen vom Steinbruch in getrennte Silos, werden im Verhältnis 77% Kalkmergel zu 23% Zusatz-Kalkstein abgezogen und gemeinsam zu Rohmehl vermahlen.

Die Mahlfeinheit dieses Rohmehles muß so gut sein, daß mit einem Sieb nach DIN 70 mit 4900 Maschen weniger als 10% und mit einem Sieb nach DIN 30 mit 900 Maschen maximal 1% Rückstände übrig bleiben.

Zum Gewinnen dieses Rohmehles dienen meistens Kugelmühlen. Walzenringmühlen verwendete man bis-

her überwiegend für kleinere Leistungen zwischen 20 bis 40 t/h.

Vor kurzem wurde nun bei einem westdeutschen Zementwerk eine Walzenringmühle der Bauart BERZ für eine größere Leistung von 83 t/h in Betrieb genommen. Die Walzenringmühle braucht gegenüber einer Kugelmühle gleicher Leistung weniger Bodenfläche. Außerdem schien sie leichter regelbar zu sein. Durch die Betriebserfahrungen konnte diese Annahme bestätigt werden.

### Aufbau der Mahlanlage

Zur Mahlanlage gehören: die Mühle, die Heißgaserzeugungsanlage, die Schotteraufgabe- und die Rohmehl-abtransport-Einrichtung. Der Mühle werden aus zwei Schottersilos mit je 1500 t Inhalt die beiden Kalksteinsorten in einer Korngröße bis zu 65 mm zugeführt. Plattenbänder ziehen das Material von den Silos ab und fördern es in ein Becherwerk. Das Material muß unter Luftabschluß in die Mühle eingebracht werden. Dazu dient eine Zellschleuse, die das Rohmaterial vom Becherwerk erhält. Das Mischungsverhältnis wird vom Betriebslaboratorium des Werkes angegeben. Es richtet sich nach dem gewünschten  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt des Rohmehls.

In der Mühle (Bild 1) fällt das aufgegeben Rohmaterial in eine sich drehende Mahlschüssel. Auf ihr rollen drei Walzen unter Druck ab. Dieser Mahldruck, der zum Zerkleinern notwendig ist, wird von kräftigen Schraubenfedern über einen Druckring auf die Ansätze der Walzen kraftschlüssig übertragen. Die Mahlschüssel, über ein Getriebe von einem 600-kW-Elektromotor angetrieben, läuft nahezu erschütterungsfrei. Alle Mahlteile sind in einem dichten Gehäuse untergebracht, das oben durch den Sichter abgeschlossen ist. In den Sockel der Mühle wird Heißgas gesaugt, das von einer senkrecht stehenden Kohlenstaubfeuerung erzeugt wird. Die Staubkohle gelangt über Dosiereinrichtungen zu den beiden Brennern für Grundlast ( $2 \cdot 10^6$  kcal/h) und für Regellast ( $1,5 \cdot 10^6$  kcal/h). Dem aus der Feuerung austretenden Heißgas mischt man Frischluft bei. Zwei Kanäle führen das Heißgas, dessen Temperatur etwa 300 °C beträgt, in den Mühlensockel. Der Luftstrom muß in vorgeschriebenen Grenzen gehalten und gleichmäßig verteilt werden. Dazu dient ein Düsenring, der die Mahl-



Bild 1 Walzenringmühle Bauart BERZ in einem Zementwerk

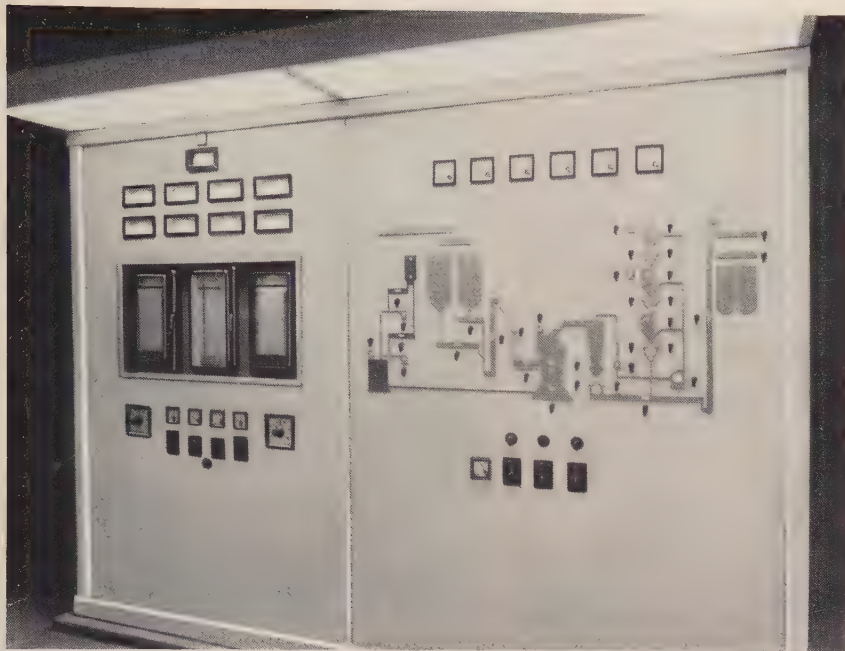


Bild 2 Blindschaltbild und Schreiber in der Warte einer Mahlanlage für Zementklinker-Rohmehl

schüssel umgibt. Aus dem Gehäuse gelangen die Heißgase in den Bereich des Sichters, der das mitgerissene Mahlgut nach Maßgabe der geforderten Mahlfeinheit trennt. Während noch nicht genügend fein gemahlenes Material auf die Mahlschüssel zurückfällt, wird das fertige Rohmehl in einem Doppelzyklon vom Gasstrom abgeschieden und ausgetragen. Luftförderinnen und Becherwerke bringen es darauf in die Rohmehlsilos. Hinter dem Zyklon scheiden Filteranlagen auch den

noch mitgeführten Rest des Rohmehls aus den Abgasen ab.

### Überwachung und Regelung

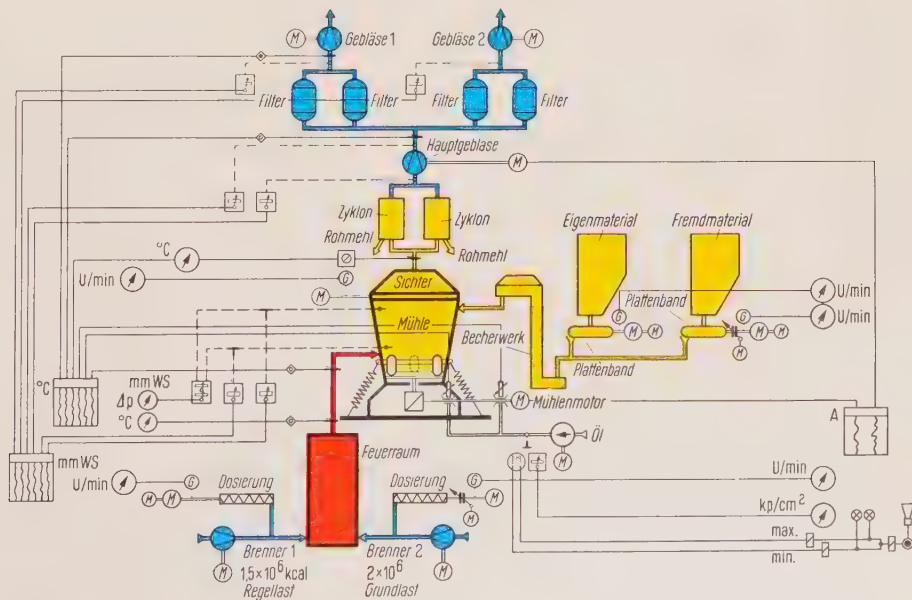
Die Anzeige-, Registrier-, Regel- und Steuergeräte sind in einer zentralen Warte zusammengefaßt (Bild 2). Die elektrischen Antriebsmotoren der Mahlanlage können in dem Blindschaltbild der Warte mit Steuerschaltern ein- und ausgeschaltet werden. Leuchtsymbole zeigen den Betriebszustand der Motoren und die Förderrichtung an. Die wichtigsten Meßwerte werden registriert. Die Schreiber sind in einem nach innen schwenkbaren Rahmen hinter Glas eingebaut. Der schematische Plan der Mahlanlage (Bild 3) zeigt den ganzen Umfang der Überwachungseinrichtungen.

### Öldruck

Den Getrieben und Lagern der Mühle wird ständig Öl

zugeführt. Wenn die Ölzufuhr einmal unterbrochen wird, muß der Antriebsmotor der Mühle stillgesetzt werden. Der Öldruck darf bestimmte Grenzwerte nicht über- oder unterschreiten. Ein Druckmesser mit einem Meßbereich von 0 bis 6 kp/cm<sup>2</sup> und mit eingebauten Maximal- und Minimalkontakten mißt den Druck in der Ölzuleitung. Aus Sicherheitsgründen hat die Anlage einen zweiten Druckmesser mit einem Meßbereich von 0 bis 10 kp/cm<sup>2</sup> erhalten. Die Wahrscheinlichkeit, daß

Bild 3 Schema einer Mahlanlage für Zementklinker-Rohmehl





beide Meßgeräte gleichzeitig ausfallen, ist sehr gering, so daß ständig eine Druckanzeige – auch bei Ausfall eines Gerätes – vorhanden ist. Werden die eingestellten Grenzwerte über- oder unterschritten, so wird optisch und akustisch Signal gegeben und der Antriebsmotor der Mühle mit einem Verriegelungsschutz abgeschaltet. Der Bedienungsmann kann das akustische Signal löschen. Das optische Signal bleibt so lange erhalten, bis der Öl-druck wieder in den geforderten Grenzen vorhanden ist.

### Rohmaterial

Es kann angenommen werden, daß die Plattenbänder aus den beiden Schottersilos bei gleichbleibender Geschwindigkeit eine konstante Menge je Zeiteinheit fördern. Die Drehzahl der Antriebsmotoren ist dann ein Maß für die Materialmenge. Als Antriebe werden Drehstrom-Nebenschlußmotoren mit verstellbaren Bürsten verwendet. Die Stellzeit beträgt etwa 60 s. Am Plattenband für den Zusatzkalkstein – »Fremdmaterial« genannt – ist ein PIV-Getriebe angebaut. Dadurch ist es möglich, daß beide Antriebsmotoren mit gleicher Drehzahl laufen können und der veränderliche Prozentsatz des Zusatzkalksteines am PIV-Getriebe eingestellt wird.

Die Mühlenbelastung hängt von der Mahlbarkeit des Aufgabegutes ab. Sie soll konstant gehalten werden. Ein Maß für die Belastung ist der Differenzdruck zwischen dem in die Mühle eintretenden Gasstrom und dem oberhalb der Mahlwerkzeuge strömenden Gemisch aus Gas und Material. Dieser Differenzdruck ist von der Materialmenge abhängig, die vom Gasstrom mitgerissen wird. Wenn der Differenzdruck konstant bleibt, ist auch die Belastung der Mühle konstant. Bei abweichender Belastung muß die Materialzufuhr geändert werden. Aus der schematischen Darstellung der Regelkreise (Bild 4)

geht die Anordnung und Wirkung der Regelgeräte hervor. Als Differenzdruckregler wurde ein TELEPERM\*-Regler S [3] eingesetzt. Der Sollwert wird empirisch ermittelt und in mm WS eingestellt. Den Istwert erhält der Regler vom Fernsender einer Differenzdruckwaage. Eine Gleichlauf-Regleinrichtung [4] bewirkt, daß gleichzeitig mit der Drehzahl des Motors für Plattenband »Fremdmaterial« auch die des Motors für das andere Plattenband über dessen Bürstenverstellantrieb entsprechend geändert wird. Das eingestellte Mischungsverhältnis der beiden Komponenten bleibt infolgedessen erhalten. Diese Regleinrichtung hat lediglich die Aufgabe, die Drehzahlen beider Antriebsmotoren gleichzuhalten. Führungsgröße ist die Drehzahl des Antriebes am Plattenband »Fremdmaterial«. Die Regelung arbeitet völlig zufriedenstellend. Eingriffe des Betriebspersonals sind nicht erforderlich. Zweckmäßig ist es, die Druckentnahmen für den Differenzdruck der Mühle mit Schnellverschlüssen zu versehen (Bild 5). Der hohe Staubanfall macht es notwendig, die Meßstellen einmal je Schicht auf Verstopfungen zu überprüfen. Mit der dargestellten Entnahmevorrichtung wurden gute Betriebserfahrungen gemacht. Die Anlage arbeitet seit etwa einem Jahr fast störungsfrei.

### Abgastemperatur

Die Feuchte des Aufgabematerials ist unterschiedlich. Die Restfeuchte des Rohmehles darf jedoch nicht kleiner als 0,8% sein. Ein reproduzierbares Abbild der Feuchte gibt bei konstanter Leistung der Mühle die Temperatur des Abgases, hinter der Mühle gemessen. Da jedoch infolge der Belastungsregelung verschiedene Mengen Rohmaterial zugeführt werden, ändert sich die auszutrei-

\* Eingetragenes Warenzeichen

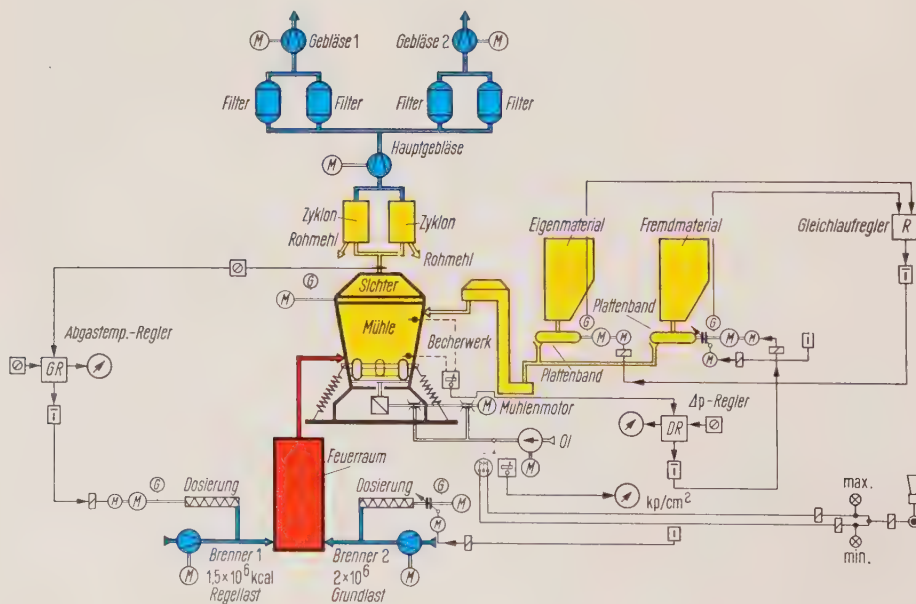


Bild 4 Regelschema der in Bild 3 gezeigten Anlage

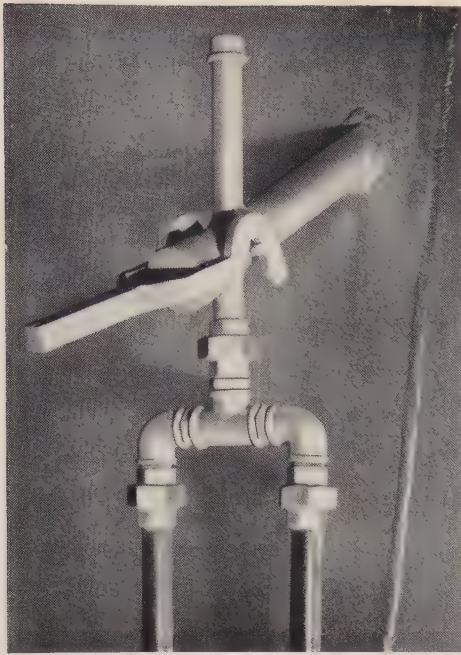


Bild 5  
Druck-  
entnahme-  
vorrichtung  
mit Schnell-  
verschluß

bende Feuchte. Der in die Mühle eingesogene Gasstrom soll das Rohmehl nicht nur austragen, sondern auch trocknen. Deshalb wird er aufgeheizt. Damit wird die Abgastemperatur auch noch von Heizwertschwankungen der Staubkohle abhängig. Bei gleichbleibender Abgastemperatur bleibt auch die Restfeuchte des Rohmehles konstant. Die Betriebsverhältnisse ermöglichen es, die Abgastemperatur als Festwert zu regeln (s. Bild 4). Der TELEPERM-Regler S mit Langzeitrückführung regelt den Regellast-Brenner. Der Istwert wird dem Regler von einem Temperatur-Meßumformer übermittelt. Die Warm-

lötstelle des Thermopaars ist dem Abgasstrom unmittelbar ausgesetzt. Dadurch wird das Thermoelement empfindlicher. Der Sollwert der Abgastemperatur liegt bei etwa 80 °C. Für die angegebene Leistung von 83 t/h ist die Feuerung genügend groß bemessen. Bei normaler Feuchte und einer mittleren Belastung ist der Regellast-Brenner bei 80 °C Abgastemperatur noch nicht voll aus-gesteuert. Er leistet dann etwa 65% seiner Maximal-leistung.

### Betriebserfahrungen

Eine Walzenringmühle der Bauart BERZ in dieser An-ordnung und Größe ist zum ersten Male mit TELEPERM-Reglern ausgerüstet worden. Seit der Inbetriebnahme im April 1960 haben sich keinerlei Betriebsstörungen ergeben. Eingriffe des Betriebspersonals sind nur dann erforderlich, wenn vom Betriebslaboratorium die Anweisung gegeben wird, das Mischungsverhältnis zu ändern. Die Mahlanlage wird in drei Schichten betrieben. Recht günstig hat sich die robuste und betriebssichere Bauweise der TELEPERM-Geräte unter diesen rauen Be-triebsbedingungen ausgewirkt. Die guten Regeleigen-schaften der TELEPERM-Regler haben die Betriebsweise der Anlage gefördert. Die Wartung der Geräte bleibt auf ein Mindestmaß beschränkt [5]. Die Regelanlage wirkt sich in einer gleichbleibenden Qualität des Roh-mehles aus. Der Wärmeverbrauch wird den tatsächlich geforderten Bedingungen angepaßt.

### Schrifttum

- [1] Hoga, A.: Der Humboldt-Drehofen mit Schwebegas-Wärmetauscher. Tonindustrie-Zeitung 78 (1954) 167 bis 171
- [2] Gumz, W.: Theorie und Berechnung der Kohlenstaub-Feuerung. Berlin (1939)
- [3] Schlick, K.: Ein neuer elektrischer Regler. Siemens-Zeitschrift 31 (1957) 482 bis 486
- [4] Automatische Gleichlauf-Regeleinrichtung. Siemens-Betriebsanleitung September 1955
- [5] Matuschka, H. und Sartorius, H.: Das kombinierte TELEPERM-TELEPERNEU-System Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 291 bis 296

## Über elektrische Ausrüstungen von Düngemittelfabriken

VON OTTO JANISCH UND KARL WEBER

In fast allen Ländern der Erde mit stark zunehmender Bevölkerung, vor allem in Asien und Afrika, werden zur Verbesserung der Bodenerträge unter Ausnutzung örtlich vorhandener Rohstoffe Düngemittelfabriken errichtet [1]. Die Planung liegt entweder bei einheimischen Regierungsstellen oder Gesellschaften oder wird Chemie-Baufirmen oder beratenden Ingenieuren im Ausland übertragen.

Die technische Erzeugung von Stickstoffdüngemitteln beruht in der Hauptsache auf der  $\text{NH}_3$ -Synthese. Für die Synthese wird das Rohgas Stickstoff durch Luftzer-

legung, das Rohgas Wasserstoff – je nach der verfügbaren Rohstoff- und Energiebasis – aus Kohle in ver-schiedenster Form, aus Kokerei- oder Naturgas oder durch  $\text{H}_2\text{O}$ -Elektrolyse gewonnen. Die aufzuwendenden Energiemengen an Strom und Dampf sind erheblich (Tafel 1). Ihre Erzeugungskosten beeinflussen daher ent-scheidend den Preis des Endproduktes und damit die Konkurrenzfähigkeit eines bestimmten Verfahrens.

### Energieerzeugung

Für chemische Prozesse mit verhältnismäßig hohem Dampfbedarf (vgl. Tafel 1, Fälle 2 und 3) bieten Eigen-



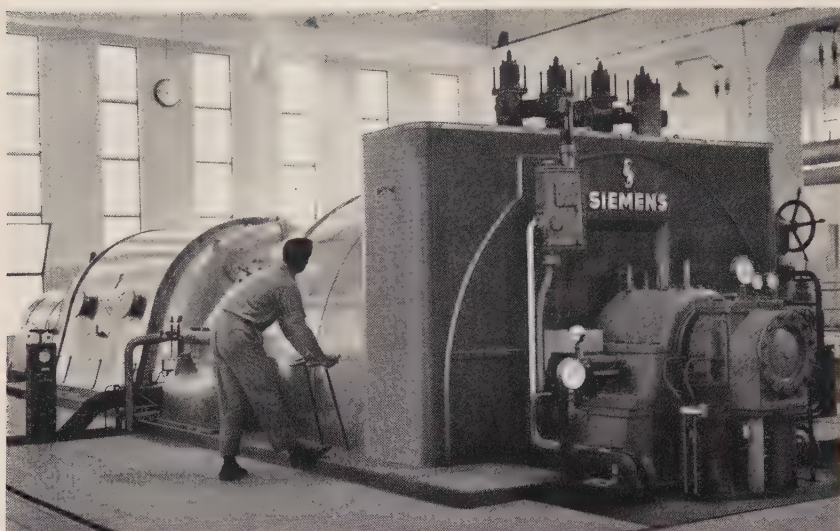


Bild 1 Entnahme-Kondensationsturbosatz 20 MW, 42,2 atü, 440 °C in der Düngemittelfabrik der Ste'Egyptienne d'Engrais et d'Industries Chimiques in Suez, Ägypten (VAR)

Fall	Sorte, Verfahren	Energiebedarf je t Endprodukt	
		Strom kWh	Dampf t/h
1	Düngesorten mit etwa 20 bis 35 % N Koksgasbasis (ohne Gaserzeugung)	600	0,20
2	wie 1, Erdgasbasis (erheblicher Anteil für O <sub>2</sub> -Kompressoren)	1500	2,00
3	wie 1, mit etwa 45 % N (Harnstoff) Kohlebasis	2200	2,10
4	wie 1, mit etwa 20 bis 35 % N Elektrolysebasis	3000	
5	Kalkstickstoff	und mehr 3000	

Tafel 1 Mittlerer Energiebedarf in der Düngemittelindustrie

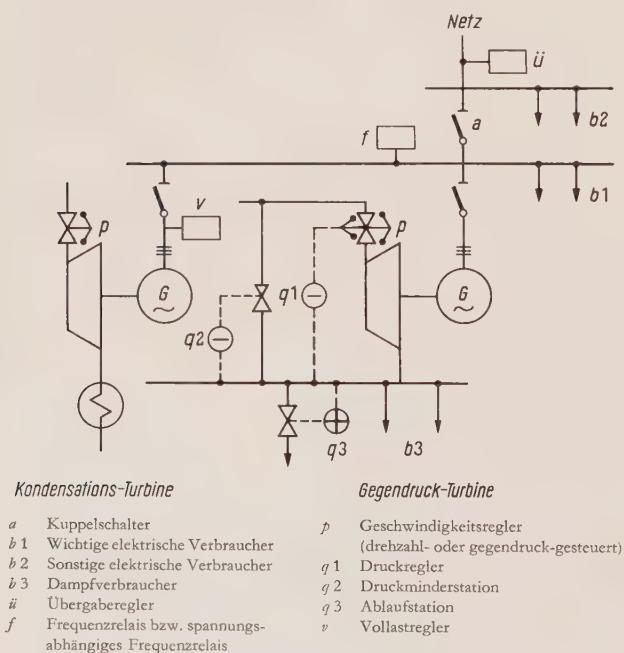


Bild 2 Einsatzmöglichkeiten der Regelungstechnik für wirtschaftliche Energieerzeugung

kraftwerke die wirtschaftlichste Lösung. Sie erzeugen den erforderlichen Fabrikationsdampf und gleichzeitig – durch Ausnutzung von Gegendruckenergie aus großen Wärmegefällen – preiswerte elektrische Energie. Da sich der Strom- und der Dampfbedarf in der Regel nicht gleichmäßig ändern, ist es zum Leistungsausgleich üblich, das Werk an ein elektrisches Fremdnetz anzuschließen oder einen nachgeschalteten Kondensationsteil (Bild 1) aufzustellen. Beim Parallelbetrieb der Eigenerzeugungsanlage im Gegendruckbetrieb mit einem Fremdnetz treten je nach den Betriebserfordernissen sehr verschiedenartige Regelaufgaben auf. Im Normalfall wird die Turbine

auf konstanten Gegendruck geregelt. Die erzeugte elektrische Leistung hängt dann allein vom Dampfbedarf des Werkes ab; sie kann den elektrischen Leistungsbedarf des Betriebes normalerweise nicht decken. Der Ausgleich geschieht dann aus dem Fremdnetz. Fällt das Fremdnetz aus, so muß von Gegendruckregelung auf Leistungsregelung umgeschaltet werden. Umgeschaltet wird automatisch, wobei als Indikator ein frequenzabhängiges Spannungsrelais dient. Zugleich wird der Druck im Dampfnetz des Betriebes durch selbsttätigen Einsatz einer Reduzierstation oder eines Abblasventils konstant gehalten. Weitere Regelaufgaben stellen sich, wenn aus wirtschaftlichen Gründen die eigenen Stromerzeugungskosten und der mit dem Energie-Versorgungs-Unternehmen vereinbarte Strompreis den Bezug und die Abgabe elektrischer Energie eingrenzen. Schließlich läßt sich bei unzureichender Eigenerzeugung durch Abschalten nicht produktionswichtiger Verbraucher, die z. B. von einer besonderen Sammelschiene gespeist werden, ein Notbetrieb aufrechterhalten. Durch zweckentsprechenden Einsatz von Reglerkombinationen wird die größte Wirtschaftlichkeit der Energieerzeugung erreicht [2]. Bild 2 läßt die verschiedenen Möglichkeiten erkennen.

Düngemittelfabriken, die auf der Dampf- und Rohstoffseite im Verbund mit Berg- oder Hüttenwerken betrieben werden, erhalten ihre elektrische Energie über besondere Umspannstationen.

### Verteilung der elektrischen Energie

Der technisch-wirtschaftliche Ablauf eines gewählten Verfahrens sowie die Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie erfordern zunächst eine sorgfältige räumliche Planung der Gesamtanlage. In der Regel werden die großen Verdichterantriebe für die Gas- und Luft-

zerlegung und für die Synthese in Hallen zusammengefaßt. Sie bilden die eigentlichen Belastungsschwerpunkte. Um diese gruppieren sich kleinere, aber zahlreiche Energieverbraucher, wie elektromotorische Antriebe, Heiztransformatoren, Beleuchtungsanlagen sowie mit Gleichstrom betriebene Geräte zum Steuern und Überwachen. Das Eigenkraftwerk oder die Umspannstation sind so anzuordnen, daß möglichst kurze Entfernungen für den Energietransport erzielt werden. Die Betriebsfläche von Düngemittelfabriken, auch solchen größter Produktionskapazität, übersteigt 1 km<sup>2</sup> nicht. Die Schaltstationen in den Belastungsschwerpunkten werden daher unmittelbar mit der Spannung der Hauptsammelschiene des Kraftwerkes oder der Umspannstation versorgt. Die meistens verwendete Spannung von 6 kV entspricht der VDE-Normreihe und ermöglicht die wirtschaftliche Bemessung großer Motoren mit Leistungen von etwa 120 kW bis zu mehreren 1000 kW. Die Verbraucher unter 120 kW werden mit 500 oder 380 V versorgt. Kleinere Mittelspannungen, beispielsweise 3,3 kV, führen zwangsläufig zu einem Dreispannungssystem von z. B. 11/3,3/0,4 kV. Dabei ergeben sich gegenüber dem Zweispannungssystem im unteren Leistungsbereich bis etwa 50 MVA höhere Anlagekosten und Verteilungsverluste [3]. Bild 3 zeigt die elektrische Schaltung einer Düngemittelfabrik.

Die Auslegung der Hauptschaltanlage im Kraftwerk oder in der Umspannstation ist in bezug auf die Wahl der Geräte – Leistungsschalter, Trenner, Wandler usw. – als auch bezüglich der dynamischen und thermischen Kurzschlußfestigkeit der übrigen Bauelemente abhängig von der Gesamtleistung und den Scheinwiderständen der einspeisenden Generatoren, Transformatoren und großen Motoren sowie von der anstehenden Kurzschlußleistung am Fremdnetz. Synchronmotoren werden für die Berechnung wie Generatoren behandelt,

wogegen man sich bei Asynchronmotoren auf die Ermittlung ihres Anteils am Stoßkurzschlußstrom beschränken und den Ausschalt- und Dauerkurzschlußstrom unberücksichtigt lassen kann. Die Hochspannungs-Unterverteilungen in der Fabrik und im Kraftwerk werden zur Senkung der Anlagekosten für Kurzschlußleistungen von 100 oder 200 MVA gebaut und, wenn nötig, über Kurzschlußbegrenzungsdröseln gespeist. Die Kurzschlußfestigkeit der Niederspannungsverteilungen und die Betriebslast bestimmen Größe und Anzahl der einspeisenden Transformatoren.

### Schaltanlagen

In allen Ländern, hauptsächlich in Anlagen für Übersee, wird die stahlblechgekapselte Bauweise bevorzugt. Sie ist gekennzeichnet durch vollkommenen Berührungsschutz und guten Staubschutz, geringen Platzbedarf und kurze Montagezeiten [4]. In seltenen Fällen wird die Hochspannungs-Hauptschaltanlage in offener Bauweise erstellt, wenn z. B. der erforderliche Raum ohnehin zur Verfügung steht und die örtlichen Bedingungen diese Bauweise zulassen.

Die Hoch- und Niederspannungs-Schaltstationen in stahlblechgekapselter Ausführung bilden mit angeflanschten Clophen-Transformatoren geschlossene Anlagen, die unmittelbar in den Verbraucherschwerpunkten in beliebigen Räumen aufgestellt werden können, soweit nicht erschwerte Bedingungen, z. B. hinsichtlich des Explosionsschutzes (H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) vorliegen. Ist das der Fall, so müssen für die Schwerpunktstationen besondere, nicht gefährdete und gut belüftete Betriebsräume geschaffen und die Durchgänge für Verbindungskabel nach der Gefahrenzone sorgfältig abgedichtet werden. Beim Hochspannungsteil macht ein ausfahrbarer Schaltwagen mit dem Leistungsschalter und den Wandlern die Geräte bequem zugänglich. Die Schalteinheiten sind in einzelne

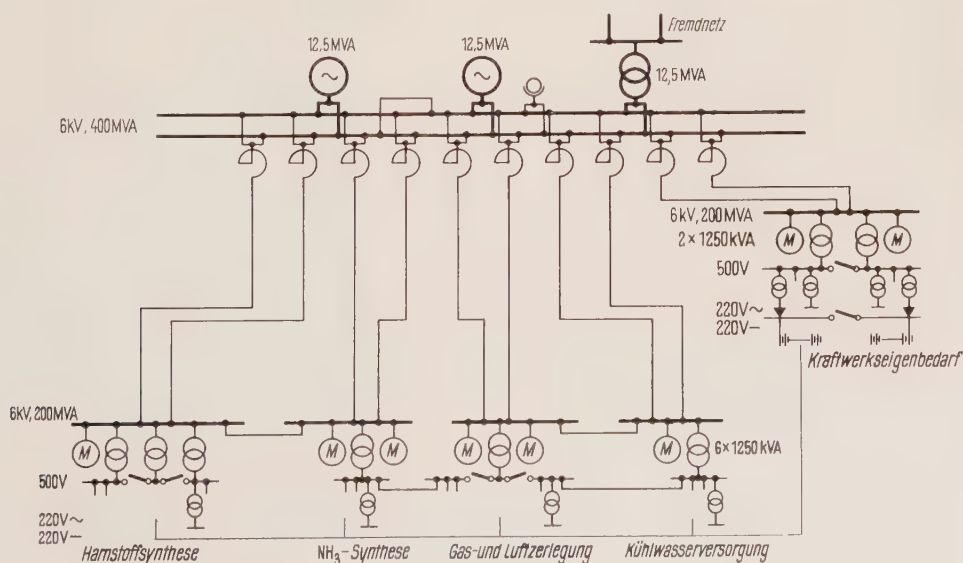


Bild 3 Grundschialtung der elektrischen Anlage einer Düngemittelfabrik (Harnstoff 85000 t je Jahr, Leistungsbedarf 23 MW) mit eigenem Dampfkraftwerk und Fremdstrombezug



Kammern unterteilt (Schottung), die die Auswirkung von Störlichtbögen auf kleine Räume begrenzen. Druckentlastungsklappen verhindern größere Zerstörungen. Der Niederspannungsteil besteht aus stahlblechgekapsteten Anlagen mit ausziehbaren Geräteblöcken. Die einzelnen Felder lassen sich, dem jeweiligen Bedarf entsprechend, bausteinartig zusammenfügen.

An diese Vorverteilungen können je nach Standort größere Motoren unmittelbar angeschlossen werden, im übrigen werden von ihnen aus Unterverteilungen zur Versorgung von Motorengruppen gespeist.

## Sicherung der Stromversorgung

Die notwendige Sicherheit wird in erster Linie durch jederzeit verfügbare Generator- oder Transformatorreserven erzielt. Produktionswichtige Verbraucher schaltet man bei Störungen – gegebenenfalls selbsttätig – durch Schnellumschaltung auf gesunde Netzteile. Die Verteilungen werden daher mindestens zweifach eingespeist und selektiv gestaffelt unter Anwendung der Schutztechnik. Bild 4 läßt erkennen, wie in einem konkreten Fall Netzstörungen ohne Produktionsausfall beherrscht werden können. Die Stationseinspeisungen sind jeweils für den vollen Leistungsbedarf ausgelegt und mit gerichteten Überstromrelais ohne Zeitverzögerung ausgerüstet. Die Kombination aus Relais und Schalter hat eine Eigenzeit von etwa 180 ms. Bei einem Kurzschluß z. B. an der Stelle *a* des Speisekabels 2 wird der Spannungs-

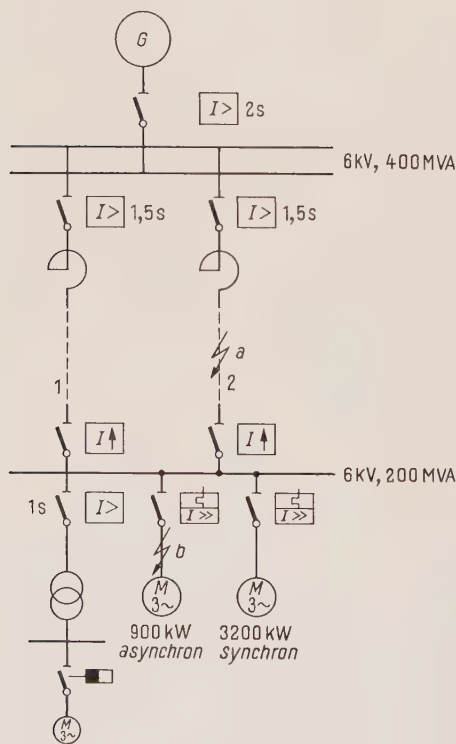


Bild 4 Stromversorgung eines Belastungsschwerpunktes

einbruch an der Stationsschiene nach etwa 180 ms bis auf einen geringen Rest, der nach der Staffelzeit von z. B. 1,5 s verschwindet, durch selektives Abschalten des Kabels 2 aufgehoben. Die Hochspannungsmotoren einschließlich des 3200-kW-Synchronmotors sowie die über abfallverzögerte Schütze angeschlossenen lebenswichtigen Niederspannungsmotoren bleiben in Betrieb. Der Synchronmotor fällt auch z. B. bei einem Kurzschluß an der Stelle *b* nicht aus, da der Schnellauslöser des Bimetallrelais den gestörten Abzweig ebenfalls mit einer Gesamteigenzeit von 180 bis 190 ms abschaltet.

## Elektromotorische Antriebe

Der elektrische Strom wird in einer Düngemittelfabrik vor allem zur Umwandlung in mechanische Energie benötigt, wenn man von den nicht bei allen Verfahren erforderlichen Leistungsverbrauchern, wie Gleichrichtern für die Wasserelektrolyse und Karbidöfen, absieht.

Der Leistungsbedarf der einzelnen Antriebe für Pumpen, Gebläse, Verdichter, Rührwerke, Mühlen, Fördereinrichtungen und Hebezeuge liegt in den Grenzen von weniger als 1 kW bis zu mehreren 1000 kW je Einheit. Alle Motoren müssen in jeder Weise für Dauerbetrieb geeignet sein und den besonderen Anforderungen in chemischen Anlagen genügen (große Beständigkeit aller Bauteile gegen Wärme, Feuchtigkeit, Korrosion und Verschmutzung) [5]. Darüber hinaus müssen sie explosionsgeschützt ausgeführt sein.

Für Düngemittelfabriken sind, wie auch sonst in der chemischen Industrie, geschlossene Motoren mit Käfigläufer in der Schutzart P 33 nach DIN 40050 besonders geeignet. Hinsichtlich des Explosionsschutzes wird dabei die Ausführung in Schutzart »Erhöhte Sicherheit« (Ex) e nach den deutschen Vorschriften VDE 0171 allgemein verwendet (Bild 5), sofern nicht besondere Bedingungen oder besondere Vorschriften des betreffenden Aufstellungslandes Schutzarten wie »Druckfeste Kapselung« (Ex) d oder »Fremdbelüftung« (Ex) f erfordern.

Für seltener notwendige Antriebe mit Drehzahlregelung werden Drehstrom-Kommutatormotoren oder transduktorgespeiste Gleichstrommotoren in der Schutzart »Fremdbelüftung« verwendet.

Große Verdichter und Pumpen mit einem Leistungsbedarf von mehreren 1000 kW werden mit Synchron- oder Asynchronmotoren angetrieben, die je nach Art der Verdichter als Langsam- oder Schnellläufer gebaut werden [6]. Die Maschinen haben Ringlaufkühlung, wobei die Kühler entweder in das Ständergehäuse oder in das Fundament der Maschine eingebaut werden. Die Bedingungen des Explosionsschutzes werden durch die Schutzart »Erhöhte Sicherheit« oder »Fremdbelüftung« erfüllt (Bild 6). Bei der Wahl der Motorart sind die Rückwirkungen auf das speisende Netz beim Anlauf und während des Betriebes zu beachten. Die Anlaufströme sind bei Asynchron- und Synchronmotoren fast gleich; unterschied-

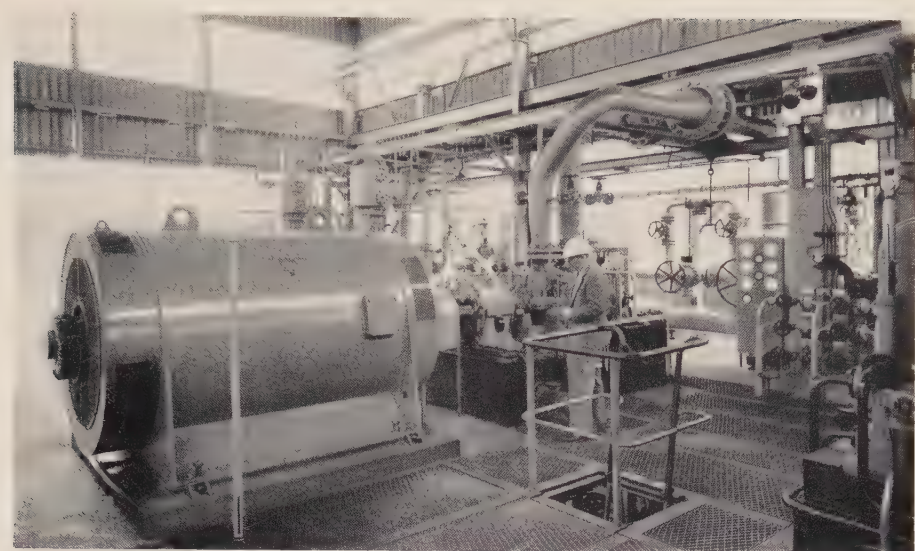


Bild 5 Explosionsgeschützter Motor 1300 kW, 5 kV, 1485 U/min in einem chemischen Betrieb

lich sind der Leistungsfaktor und das Verhalten bei Spannungsänderungen. Der Asynchronmotor entnimmt dem Netz Blindleistung, wogegen der Synchronmotor je nach Belastungszustand und Erregung Blindleistung an das Netz abgeben kann.  
Bei Spannungsänderungen im Netz verhalten sich Asynchron- und Synchronmaschinen verschieden, je nachdem,

ob es sich um kurzzeitige Spannungseinbrüche bis auf etwa  $\frac{1}{3}$  der Nennspannung oder um länger dauernde Spannungsminderungen auf etwa 60 bis 65 % der Nennspannung handelt. Das verschiedenartige Verhalten ergibt sich dadurch, daß das Drehmoment des Asynchronmotors mit der zweiten Potenz, das des Synchronmotors dagegen linear mit der Spannung zurückgeht und der Asynchronmotor nach kurzzeitigem Drehzahlabfall selbsttätig wieder hochlaufen kann. Der Synchronmotor ist starr an seine Drehzahl gebunden und ein Schlüpfen bei Nennlast ist gleichbedeutend mit Außertrittfallen (Tafel 2).

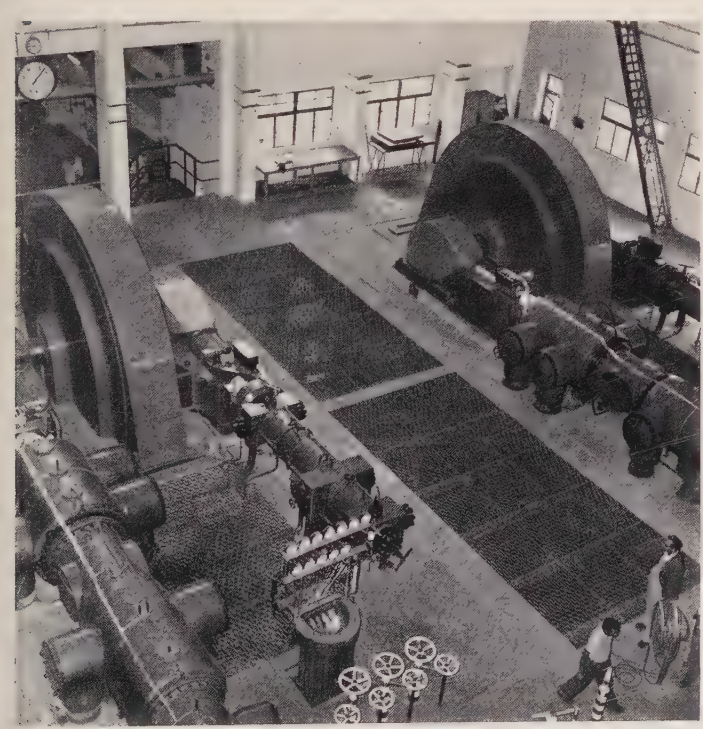


Bild 6 Explosionsgeschützte Synchron-Kompressormotoren 2000 kW, 6,6 kV, 150 U/min in der Düngemittelfabrik der New Central Jute Mills Co., Ltd., Varanasi (Indien)

Motorart	Spannungsminderungen auf etwa 60 bis 65% $U_N$ ; Dauer etwa 1 bis 3 s	Kurzzeitige Spannungseinbrüche auf 33% $U_N$ während etwa 0,5 s
Synchronmotor	bleibt bei konstanter Erregung in Betrieb	kommt zum Stillstand
Asynchronmotor	kommt zum Stillstand	bleibt in Betrieb

$U_N$  Nennspannung

Tafel 2 Verhalten von Drehstrom-Asynchron- und -Synchronmotoren bei Spannungsänderungen im Netz und Betrieb mit Nennlast

Wie sich der Einsatz von Synchronmotoren anstelle von Asynchronmotoren bei Großantrieben auf den Bezug von Blindleistung auswirkt, ist in der Energiebilanz (Bild 7) für eine Düngemittelfabrik mit einem Wirkleistungsverbrauch von 23 MW dargestellt. Werden alle Antriebe mit Asynchronmotoren bestückt, so ergibt sich die Scheinleistung



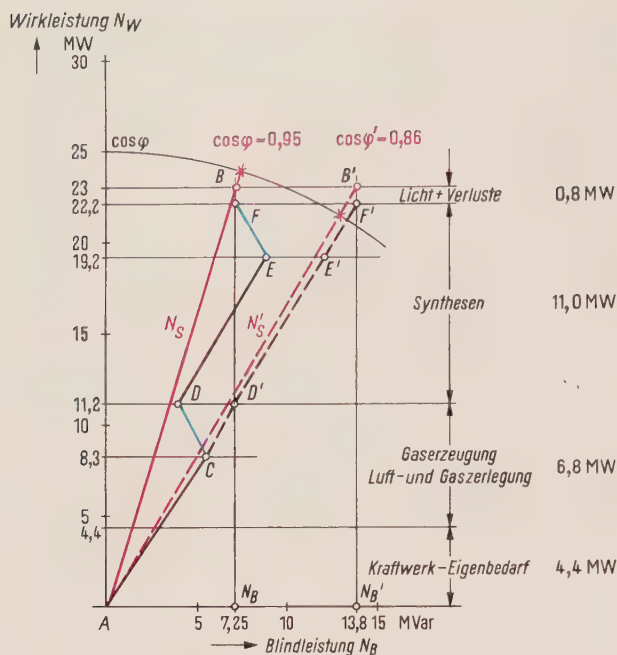


Bild 7 Energiebilanz

$N'_S = 26,8 \text{ MVA}$  (Strecke  $AB'$ ) bei  $\cos \varphi' = 0,86$ . Wählt man dagegen im Anlagenteil »Luft- und Gaserzeugung« für zwei Antriebe von je 1450 kW und im Anlagenteil »Synthesen« einen Antrieb von 3000 kW mit Synchronmotoren bei  $\cos \varphi = 0,9$  kap. (Strecken  $CD$  und  $EF$  anstelle  $CD'$  und  $E'F'$ ), so verringert

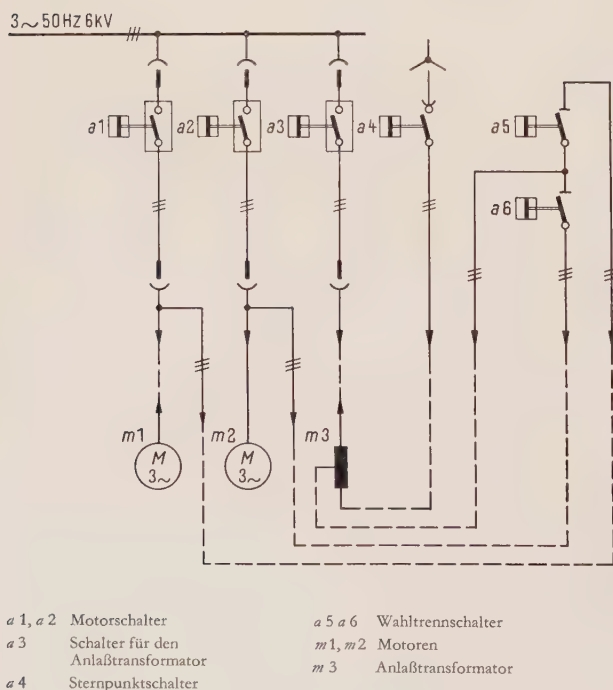


Bild 8 Schaltung für den Teilspannungsanlauf von zwei Motoren über einen Anlaßtransformator

sich die Scheinleistung auf  $N_s = 24,1 \text{ MVA}$  (Strecke  $AB$ ), und der Leistungsfaktor verbessert sich auf  $\cos \varphi = 0,95$ . Der Blindleistungsbezug vermindert sich von 13,8 auf 7,25 MVar. Ähnliche Überlegungen wird man auch bei der Erweiterung von Fabrikanlagen anstellen [7].

Für Asynchronmotoren mit Käfigläufer spricht, daß sie einfacher gebaut sind und keine besonderen Einrichtungen für das Anlassen und den Betrieb benötigen. Synchronmotoren erfordern dagegen eine Anlaufautomatik und einen Erregerumformer oder Erregergleichrichter, die zusätzlich Platz benötigen und einer gewissen Wartung bedürfen. So ergeben sich für beide Motorarten gewisse Vorzüge, die beim Projektieren der Antriebe von Fall zu Fall gegeneinander abzuwägen sind [8].

Die für den Betrieb einer Kompressoreinheit notwendigen Hilfsantriebe – z. B. Erregerumformer bei Synchronmotoren, Ölpumpen und Lüfterantriebe für Fremdbelüftung – sind für Anschluß an Niederspannung ausgelegt. Es ist zweckmäßig, diese Hilfsantriebe statt an das allgemeine Niederspannungsnetz über einen besonderen Transformator an den gleichen Hochspannungsabzweig wie den Hauptmotor anzuschließen. Man erreicht damit, daß Störungen im allgemeinen Niederspannungsnetz den Betrieb der Kompressoreinheit nicht beeinflussen. Für den Transformator, dessen Leistung je nach Größe des Antriebes etwa 50 bis 100 kVA beträgt, wählt man vorzugsweise Clophen-Ausführung, damit er an beliebiger Stelle aufgestellt werden kann.

Einschaltströme großer Motoren, die etwa zwischen dem 3,5- bis 5,5fachen Nennstrom liegen, verursachen im Netz kurzzeitige Spannungsabfälle. Die Auswirkung dieser Einschaltströme auf die übrigen, an die gleiche Sammelschiene angeschlossenen Verbraucher ist zu untersuchen. Je nach dem Ergebnis dieser Untersuchungen wird man die Anlaufströme durch geeignete Anlaufverfahren vermindern und z. B. Teilspannungsanlauf über Anlaßtransformator, Drosselanlauf oder in gewissen Fällen auch Teilwicklungsanlauf anwenden. Handelt es sich um mehrere gleiche Antriebe, so kann zur Verringerung des Anlagenaufwandes bei Teilspannungsanlauf ein Anlaßtransformator für mehrere Motoren eingesetzt werden (Bild 8).

Bei Kolbenverdichtern treten während einer Kurbelumdrehung Unterschiede der vom Motor aufzubringen den Momente auf. Diese verursachen Stromschwankungen, die im speisenden Netz zu Spannungsschwankungen mit einer Frequenz entsprechend der Motordrehzahl führen. Die Spannungsschwankungen, deren Größe auch von der einspeisenden Netzleistung abhängig ist, können sich nachteilig auf die übrigen Verbraucher auswirken und z. B. zu Lichtflimmern führen. Durch Vergrößern der Eigenschwungmomente der Motoren und gegebenenfalls durch Versetzen der Kurbeln bei zwei- und mehrkurbeligen Verdichtern können jedoch diese Spannungsschwankungen auf ein zulässiges Maß ver-

mindert werden. Zur Untersuchung dieser Netzrückwirkung muß das vom Verdichterlieferanten erstellte Tangential- oder Drehkraftdiagramm zur Verfügung stehen.

Allgemeines

Die Kabelführung sowohl innerhalb der Gebäude als auch im Freien muß rechtzeitig im Zusammenhang mit den Gebäuden und den Trassen der Rohrleitungen, Straßen, des Entwässerungssystems usw. geplant werden. Eine übersichtliche Kennzeichnung der Kabel ist unerlässlich. Der Erdung ist besondere Beachtung zu schenken. Für das Niederspannungsnetz bietet das Schutzleitungssystem den Vorteil eines ungestörten Betriebes bei Auftreten eines Einfach-Erdschlusses. Nach einer Erdschlußmeldung kann im geeigneten Zeitpunkt bei vorübergehender Nullung durch Einlegen eines besonderen Hebel-schalters der Erdschluß ermittelt und behoben werden. Bei Netzausfall müssen wichtige Meß- und Bedienungsstände sowie Fluchtwege ausreichend beleuchtet sein. Hierfür werden in den einzelnen Gebäuden besondere kleine Batterien mit Ladegeräten aufgestellt. Selbstverständlich ist das gesamte Werkgelände mit einer Fernsprechanlage mit Fremdanschluß auszurüsten. Häufig dient zusätzlich noch eine Sprechanlage über Mikrofon zur gleichzeitigen Kommandogabe des leitenden Ingenieurs an alle zuständigen Bedienungsstellen. Die Rückmeldungen werden meistens fernmündlich gegeben. Eine Feuermeldeanlage dient zur eindeutigen und raschen Anzeige des Standorts ausgelöster Melder an einer zentralen Überwachungsstelle.

Bei der Auslegung, Lieferung und Erstellung elektrischer Ausrüstungen für Düngemittelfabriken im Ausland

sind die in Tafel 3 zusammengestellten Vorschriften, Bedingungen und Verhältnisse zu beachten.

Vorschriften	Klimabedingungen	Sonstiges
VDE, sonst IEC, BSS ASA, NEC NEMA  Außerdem zu beachten: Explosions-schutz in zahlreichen Betriebsräumen (H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> )	Höchste Lufttemperatur Relative Luftfeuchte in % Regenzeit, Betauung Bestandteile z. B. an Meersalzen, Schwefelverbindungen oder Flugsand in der Luft; Schimmelpilzbefall Schäden durch Termiten, Ameisen, Eidechsen, Ratten, Schlangen Sonneneinstrahlung ↓ Tropenausführung	Verpackung Transport- und Lagerungsverhältnisse Zollabfertigung

Tafel 3 Vorschriften und Bedingungen bei der Erstellung elektrischer Anlagen in Düngemittelfabriken im Ausland

Schrifttum

[1] Köhler, F.: Rohstoffgrundlagen und Herstellungsverfahren der am häufigsten angewandten Stickstoffdüngemittel. Chemische Industrie XII (1960) 5 bis 12

[2] Maier, F.: Leistungsregelung von Industrieanlagen im Verbundbetrieb. Elektro-Welt (1957) 100 bis 103

[3] Funk, G.: Stromverteilung in chemischen Betrieben. ETZ-B 5 (1953) 165 bis 169

[4] Oberhäuser, R.: Stand und Entwicklung im Schaltanlagenbau. Siemens-Zeitschrift 30 (1956) 306 bis 319

[5] Egli, W.: Anforderungen der chemischen Industrie an die Elektromotoren. ETZ-A 76 (1955) 558 bis 566

[6] Bahr, G., Hübner, G. und Waltenberger, E.: Entwicklungsstand großer Drehstromantriebe für die chemische Industrie. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 333 bis 344

[7] Goeschel, H. und Lampel, E.: Elektrisch angetriebene Kolben-Gasverdichter in chemischen Großanlagen. Siemens-Zeitschrift (1938) 365 bis 380

[8] Treuheit, J.: Fortschritte bei elektrischen Großantrieben langsamlaufender Kolbenkompressoren. Siemens-Zeitschrift 29 (1955) 175 bis 179

Verfahrensgerechte Spannungssteuerung von Elektrofiltern

VON ERNST SCHWARZ, ROLF SCHLITT UND GEORG FRIEDRICH GÖTZ

Schon vor geraumer Zeit ist man dazu übergegangen, Elektrofilter (Bild 1) mit Hilfe elektrischer Steuergeräte selbsttätig auf optimalen Abscheidegrad einzustellen. Dies geschieht aus verschiedenen Gründen. So kann z.B. die Forderung nach möglichst geringer Staubemission oder höchster Reinheit der industriell weiterverwerteten Gase nur dann erfüllt werden, wenn unvermeidbare Schwankungen des den Elektrofiltern vorgeschalteten Verfahrens durch Erfassung jener Größen steuerungs-technisch weitgehend ausgeglichen werden, die den Abscheidegrad der Elektrofilter bestimmen. Dieser Aus-

gleich ist in jedem Augenblick erforderlich, wenn das Abscheideoptimum erreicht werden soll, eine Forderung, die durch Überwachung seitens des Betriebspersonals praktisch nicht erfüllbar ist. Der Personalaufwand zur Lösung dieser Aufgabe ist wegen der meistens großen Anzahl von Elektrofilteranlagen innerhalb eines Betriebes nicht möglich und auch wirtschaftlich nicht vertretbar.

Die Entwicklung einer selbsttätig arbeitenden, verfahrensgerechten Steuerung zum optimalen Betrieb von Elektrofiltern setzt die Kenntnis der Größen voraus, die



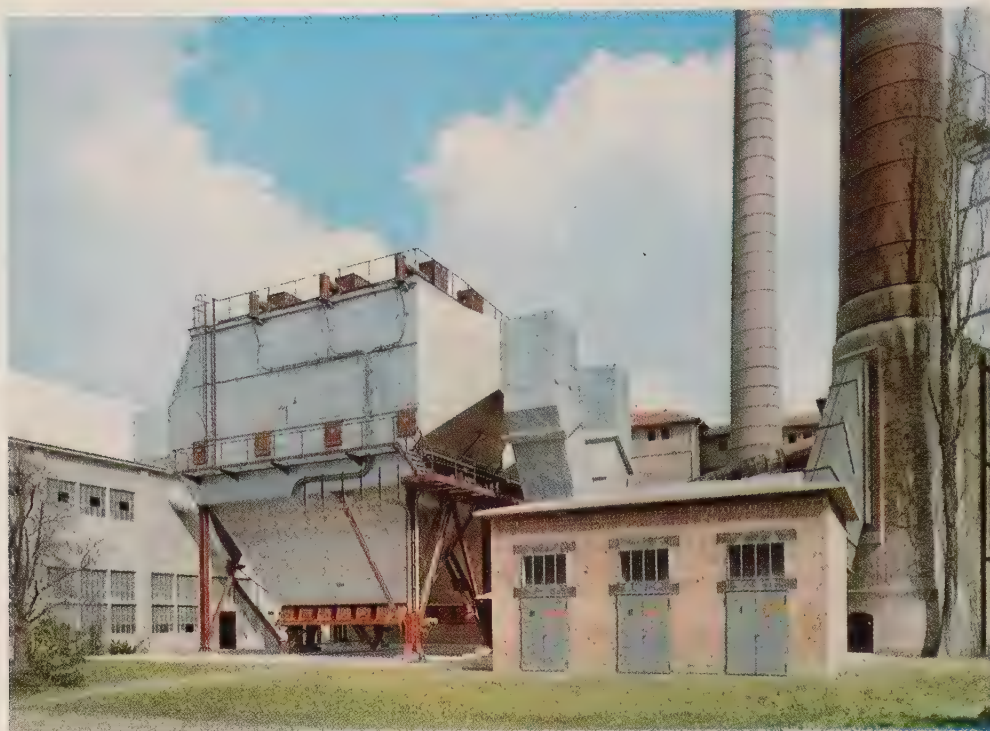


Bild 1 Lurgi-Elektrofilter für 160 000 Nm<sup>3</sup>/h in einem Zementwerk

auf den Abscheidegrad  $\varepsilon$  des Elektrofilters Einfluß haben. Sie sind bereits in der Gleichung

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{Fw}{M \cdot 100}} \quad (1)$$

enthalten. Hierin bedeuten:

$F$  Niederschlagsfläche in m<sup>2</sup>

$w$  Wanderungsgeschwindigkeit der aufgeladenen Teilchen in Richtung auf die Niederschlagelektrode in cm s<sup>-1</sup>

$M$  Gasmenge in m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> bei der Temperatur  $t$  in °C

Für die Wanderungsgeschwindigkeit  $w$  gilt:

$$w = \frac{EQ}{3\pi\eta d} \quad (2)$$

Hierin sind:

$E$  Elektrische Feldstärke in V/m

$Q$  Ladung der Staubteilchen in As

$\eta$  Dynamische Zähigkeit des Gases in kg s cm<sup>-1</sup>

$d$  Teilchendurchmesser in mm

Mit Gleichung (1) ergibt sich für den Abscheidegrad:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{1}{M \cdot 3\pi\eta d \cdot 100}} \quad (3)$$

oder

$$\varepsilon = 1 - e^{-A} \quad (4)$$

Wie ersichtlich, ist der Abscheidegrad eines Elektrofilters vom Exponenten  $A$  abhängig. Eine Änderung der ihn bestimmenden Größen bewirkt eine Erhöhung oder Verminderung des Abscheidegrades. Aufgabe einer selbsttätigen Optimalsteuerung ist es, unter den jeweils gegebenen Betriebszuständen diejenigen Faktoren des Exponenten  $A$  möglichst groß zu halten, die den Gesamtwert von  $A$  vergrößern und deren Änderung mit elektrischen Mitteln während des Betriebes möglich ist.

Die Größen  $F$  (Niederschlagsfläche) und  $M$  (Gasmenge) sind durch die Auslegung gegeben; sie bestimmen die Maße und den konstruktiven Aufbau des Elektrofilters. Sie sind im Betriebszustand bei vorgeschriebener Leistung nicht veränderlich, denn eine Drosselung z.B. der Gasmenge  $M$  würde zwar eine Erhöhung des Abscheidegrades zur Folge haben, aber zugleich eine Leistungsminderung des vorgeschalteten Prozesses voraussetzen. Die Größe  $\eta$  (dynamische Gas Zähigkeit) ist durch das Verfahren gegeben und wird u.a. durch die Temperatur des Gases bestimmt. Sie kann bei dem Betrieb einer Anlage durch Einrichtungen vor dem Elektrofilter, wie z.B. Kühler mit zusätzlicher Regelungsanlage, in Richtung kleinerer Werte beeinflußt werden. Die Teilchengröße  $d$  ist durch die Art des dem Elektrofilter zugeführten und abzuscheidenden Staubes in mehr oder weniger weiten Grenzen gegeben, also unbeeinflußbar.

Der Exponent  $A$  enthält außerdem noch die zwischen den Sprüh- und Niederschlagelektroden des Elektrofilters herrschende elektrische Feldstärke  $E$  und die

Ladung  $Q$  der Staubteilchen. Die Untersuchung kann dabei auf die Größe  $E$  beschränkt werden, da  $Q$  von  $E$  abhängig ist.

Setzt man für die mittlere elektrische Feldstärke

$$E = \frac{U}{s} \quad (5)$$

wobei  $U$  die angelegte Spannung in V und  $s$  den Elektrodenabstand in m bedeutet (ebenfalls keine veränderliche Auslegungsgröße), so ergibt sich die eindeutige Folgerung, daß die an das Elektrofilter angelegte Spannung diejenige Größe ist, durch deren Änderung die Abscheideleistung während des Betriebes beeinflußt werden kann. Durch Steuerung auf den jeweils möglichen Höchstwert erreichen auch der Exponent  $A$  und damit der Abscheidegrad  $\varepsilon$  Höchstwerte.

Die Aufgabe einer selbsttätigen Spannungssteuerung ist somit klar umrissen. Sie muß bewirken, daß die an ein Elektrofilter angelegte Spannung für jeden Betriebszustand möglichst hoch ist; jede Erhöhung der Spannung geht letztlich durch ihre Proportionalität zu  $Q$  exponentiell in die Gleichung (3) für den Abscheidegrad ein. Die höchstmögliche Spannung in einem Elektrofilter liegt wenig unterhalb der Durchbruchgrenze des Gas-Staub-Gemisches, d.h., sie liegt etwas niedriger als die Spannung, bei der ein Lichtbogendurchschlag im Elektrofilter auftritt. Der Filterstrom muß sich in jedem Augenblick bei der angelegten Höchstspannung frei einstellen können.

Aus der Tatsache, daß die Filterspannung die beherrschende Größe im Filterbetrieb ist, ergeben sich für eine verfahrensgerechte selbsttätige Spannungssteuerung folgende Forderungen:

a) Die Betriebsspannung ist stets nahe an der Durchbruchgrenze des Gases zu halten. Die Automatik muß daher dem vom jeweiligen Gas-Staub-Gemisch abhängigen Zeitverlauf der Überschlagnspannung folgen.

- b) Die Hochspannungsgrenze muß in Abhängigkeit von den Schwankungen des Betriebes in einstellbaren, d.h. dem Betrieb anpaßbaren Perioden abgetastet werden, wobei während einer Abtastperiode die eingestellte Spannung konstant bleiben soll.
- c) Die Spannungsänderungen sollen auf jedem Teil der Strom-Spannungs-Kennlinie des Filters bei gleicher Zeitdauer der gegebenen Steuerimpulse konstant sein.
- d) Während des Hochregelns soll die Spannung durch gleichbleibende zeitliche Spannungsänderung an die Ionenbeweglichkeit des Gases angepaßt werden.
- e) Ein beim Abtasten der Durchbruchgrenze entstehender Lichtbogen muß gelöscht und die dabei an der Sprühelektrode umgesetzte Energie durch geeignete Strombegrenzung so klein gehalten werden, daß keine Beschädigungen eintreten.
- f) Nach dem Umschalten von selbsttätiger Steuerung auf Handbetrieb muß die eingestellte Filterspannung unverändert bleiben.

### Arbeitsweise der selbsttätigen Steuerung für Hochspannungs-Gleichrichteranlagen

Die erste Ausführung der Automatik, die den genannten Forderungen gerecht wurde, war ausschließlich mit Schützen, elektromagnetischen Auslösern und motorischen Zeitrelais bestückt. Obwohl diese Arbeitsweise die verfahrenstechnischen Anforderungen gut erfüllte, war der Funktionsablauf nicht immer folgerichtig. Die zur Steuerimpulsgebung verwendeten Überstrommoment-auslöser waren in der Sicherheit ihrer Kontaktgabe abhängig von der Stromhöhe und der Brenndauer der im Elektrofilter auftretenden Durchschläge. Bei manchen Durchschlägen war die Kontaktgabe der Auslöser zu

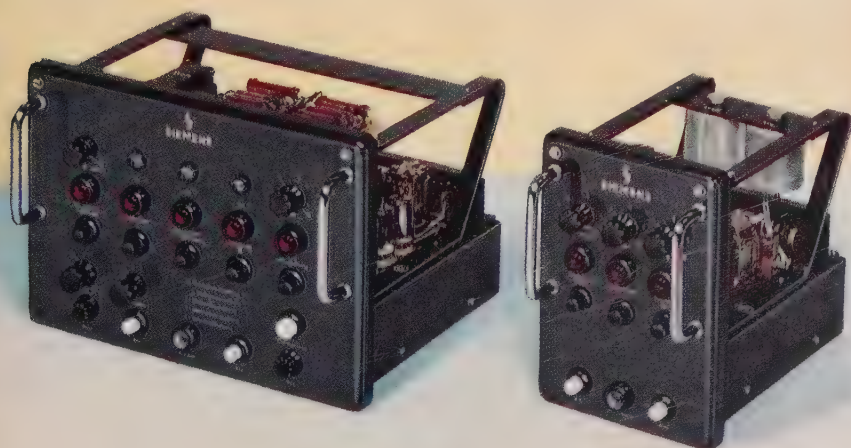


Bild 2 Einsätze einer selbsttätigen Elektrofilter-Steuerung



kurz, um einen einwandfreien Schaltablauf der nachgeschalteten Schütze und Zeitrelais zu erreichen.

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen und umfangreichere Steueraufgaben zu lösen, ging man mit Erfolg auf eine Kombination elektronischer Zeit- und Auslösekreise mit Kaltkathodenthyratrons und elektromagnetischen Relais über.

Mit diesen Kombinationen lassen sich alle auftretenden Impulse von Elektrofilterdurchschlägen jetzt auch selektiv nach ihrer Stromhöhe erfassen; sie lösen einen eindeutigen Steuervorgang aus.

Die Steuergeräte sind als Einschübe gebaut, die leichtes Einstellen der Betriebswerte und einen schnellen Austausch ermöglichen (Bild 2).

Bild 3 zeigt die Blockschaltung einer Elektrofilter-Steuerung.

Nach dem Einschalten wird die Filtergleichspannung mit einer der Ionisierungsgeschwindigkeit im Elektrofilter angepaßten Spannungsänderung bis zum Lichtbogendurchschlag gesteigert. Dieser zeigt an, daß die Maximalgrenze der Spannung überschritten ist. Die gemessene Kurzschlußstromstärke wird in eine ihr proportionale Spannung umgeformt (1 in Bild 3), die in einem Auslöser (Bild 4) eine Kaltkathodenröhre zündet. Der Auslöser unterbricht die Hochsteuerung der Spannung und leitet eine Spannungserniedrigung mit erhöhter Geschwindigkeit ein (s. 6 in Bild 3), so daß rasch ein Sicherheitsabstand von der Durchbruchgrenze des Gases erreicht wird.

Lichtbogen, die nicht von selbst erlöschen, werden durch sofortiges oder verzögertes Abschalten der Speisespannung zum Verlöschen gebracht (8 in Bild 3). Wird dann wieder eingeschaltet, so ist die Speisespannung infolge eines Widerstands oder durch eine entsprechende Gegenspannung im Hauptstromkreis vermindert. Damit liegen Spannungsstöße, die einen erneuten Durchschlag beim Wiedereinschalten veranlassen könnten, unterhalb der Durchschlagsgrenze (A in Bild 5).

Nach Aufheben der vorübergehenden Spannungsminde- rung (s. 9 in Bild 3) ist die gewünschte Spannung am Filter eingestellt. Sie liegt um einen einstellbaren Betrag unterhalb der Durchschlagsgrenze. Dieser am Zeitglied für das Vermindern der Spannung wählbare Betrag darf in seiner Größe nicht durch Ändern der Strom-Spannungs-Kennlinie des Filters oder der Kennlinie des Spannungsstellers beeinflusst werden.

Die Steuerung ermöglicht das Löschen von Lichtbögen im Elektrofilter nach vier verschiedenen Betriebsarten:

1. Wiedereinschalten nach Abschaltverzögerung
2. Wiedereinschalten nach Sofortabschaltung
3. Abschaltverzögerung ohne Wiedereinschalten
4. Sofortabschaltung

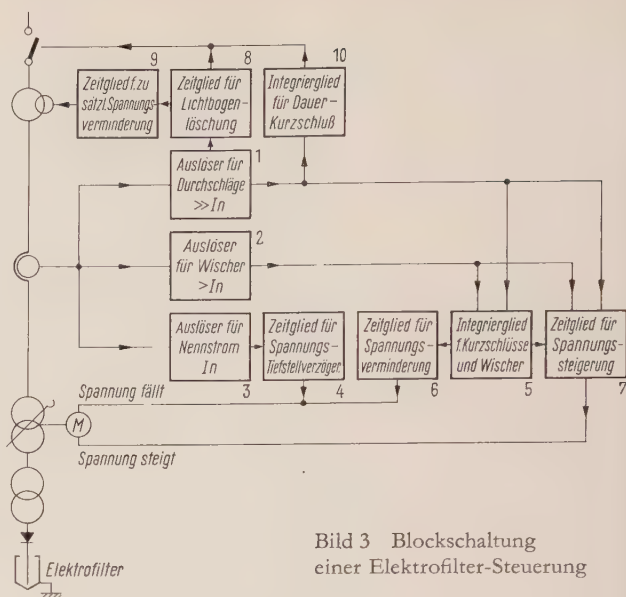


Bild 3 Blockschaltung einer Elektrofilter-Steuerung

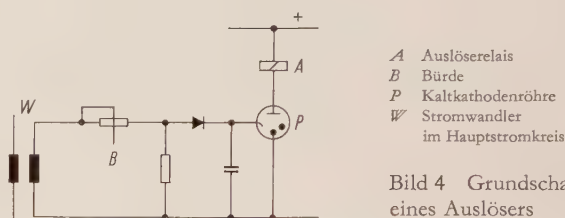
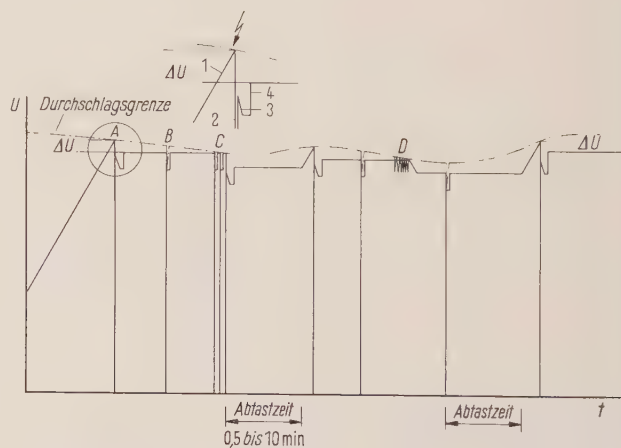


Bild 4 Grundsaltung eines Auslösers



1. Höhersteuerung bis zum Durchschlag
2. Kurzzeitige Abschaltung
3. Tiefsteuerung mit zusätzlicher Spannungsminde- rung
4. Ende der zusätzlichen Spannungsminde- rung

Bild 5 Arbeitsweise der selbsttätigen Spannungssteuerung

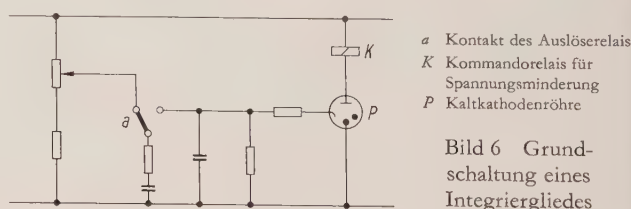


Bild 6 Grundsaltung eines Integriergliedes

Im ersten Fall schaltet die Anlage bei selbstflöschendem Lichtbogen nicht aus. Sobald der Kurzschlußstrom den am Steuereinschub vorgewählten Auslösewert erreicht, wird er von einem integrierendem Glied registriert (5 in Bild 3). Das Integrierglied (Bild 6) bewirkt, daß nur häufige Durchschläge eine Spannungsminderung auslösen und nicht schon einzelne Durchschläge, die zwischen zwei Hochspannungssteigerungen auftreten.

Einzelne Durchschläge, gleichgültig ob sie sofort oder verzögert abgeschaltet werden, führen nicht zu einer Spannungsminderung, da angenommen werden kann, daß kurzzeitige Störungen im Elektrofilter oder im vorgeschalteten Verfahren die Ursache sind (s. *B* in Bild 5).

Ändert sich der stationäre Gaszustand in Richtung kleinerer Durchschlagspannungen, so löst die auftretende Durchschlagsreihe über den Integrator eine Spannungsminderung aus, und zwar so, als ob ein erzwungener Durchschlag bei einem Hochsteuervorgang eingetreten wäre (s. *C* in Bild 5).

Stromschwache Durchschläge mit Stromstärken zwischen dem Nennstrom der jeweiligen Stromversorgungsanlage und dem eingestellten Kurzschlußauslösestrom leiten im Hauptstromkreis keinen Abschaltvorgang ein (s. 2 in Bild 3). Diese »Wischer« werden ebenfalls vom Integrator erfaßt, jedoch nur mit dem halben Wert der stromstarken Durchschläge. Die Speisespannung des Filters wird demnach nur dann vermindert, wenn die Anzahl der Wischer etwa doppelt so groß ist wie die Anzahl der eingestellten stromstarken Durchschläge in der gleichen Zeiteinheit (s. *D* in Bild 5).

Nach einer dem jeweiligen Filterverfahren entsprechenden Abtastzeit wird die Spannung wieder erhöht. Diese Zeit läuft nach jedem Durchschlag neu an.

Ändert sich die Strom-Spannungs-Kennlinie eines Elektrofilters z.B. durch Vermindern des Gasdurchsatzes derart, daß der Nennstrom der Hochspannungsgleichrichteranlage überschritten wird, so bewirkt ein dritter (auf den Nennstrom der Anlage eingestellter) Auslöser (s. 3 in Bild 3), daß die Spannung so lange vermindert wird, bis keine Überlastung mehr besteht. Nimmt der Filterstrom wieder ab, weil der ursprüngliche Gaszustand eingetreten ist, so erhöht sich nach der Abtastzeit die Spannung, bis der Nennstrom wieder fließt, falls nicht zuvor die Durchschlaggrenze erreicht ist.

### Sonderausführungen

Die beschriebene Steuerung läßt sich für die meisten Elektrofilteranlagen verwenden. Es gibt jedoch einige besondere Fälle, für die sich eine abgewandelte Ausführung empfiehlt. Als Beispiel seien das Konstantspannungssystem und das Konstantstromsystem beschrieben.

Manche Anlagen erfordern eine Automatik, die auf konstante Filterspannung regelt. Die Arbeitsweise ist ähnlich

wie die zuvor beschriebene, jedoch wird die Spannung nicht bis zum Durchschlag erhöht, sondern nur bis zu einem vorgewählten Wert. Wenn die Spannung am Filter wegen Änderungen der Netzspannung oder wegen steigender Strombelastung fällt, so wird nachgeregelt. Durchschläge aufgrund von Störungen im Verfahren führen zu einem sofortigen Tieferstellen der Spannung oder zum Abschalten.

Falls der Istwert der Spannung gleich dem vorgewählten Sollwert ist und der Strom wegen Änderungen der Gasmenge oder der physikalischen Eigenschaften des Gasstaub-Gemisches über die zulässige Nennstromgrenze hinaus steigt, so wird die Spannung so lange erniedrigt, bis der Nennstrom wieder unterschritten wird.

Manche Anlagen müssen auf konstanten Betriebsstrom geregelt werden, der aufgrund von Erfahrungswerten eingestellt wird. Diese Einstellung wurde bisher durch Ändern der Spannung an Stelltransformatoren oder Induktionsreglern vorgenommen. Jedoch werden jetzt in steigendem Maß Transduktoren hierfür eingesetzt. Der stromsteuernde Transduktor drückt – entsprechend dem Gleichgewicht der Amperewindungszahlen der Steuer- und der Arbeitswicklung – dem Elektrofilter einen konstanten Betriebsstrom auf, dessen Größe vom Steuerstrom bestimmt wird und der unabhängig vom Innenwiderstand des Filtersystems ist.

Bei Durchschlägen in solchen Anlagen bewirken Unterspannungsrelais oder Überstromrelais, die das kurzzeitige Überspringen des Transduktors ausnutzen, daß Lichtbogen sofort gelöscht werden. Würde man auf die sofortige Löschung verzichten, so wäre die Ausgangsspannung der Anlage gleich der Lichtbogenspannung, die der Transduktor bei dem eingestellten Arbeitsstrom zur Verfügung stellen würde.

### Stromsteuernde Transduktoren in Elektrofilteranlagen

Große Elektrofiltereinheiten erfordern beim Betrieb an der Durchschlaggrenze meistens Stromversorgungsanlagen großer Leistung. Heute werden bereits Hochspannungsgleichrichter mit Leistungen bis 150 kVA gebaut. Hierbei ergeben sich im Augenblick des Lichtbogenkurzschlusses so hohe Ströme, daß die Gefahr einer Beschädigung des Abscheidesystems besteht. Der Lichtbogenstrom muß also begrenzt werden. Für kleinere Anlagen bis 30 kVA genügt eine im Primärkreis des Hochspannungsgleichrichters liegende Drossel; bei Leistungen über 50 kVA ist ein genau begrenzender stromsteuernder Transduktor angebracht.

Es liegt nahe, den stromsteuernden Transduktor mit linear veränderbarem Aussteuerungsgrad außer zur Strombegrenzung auch zur Spannungsverstellung auszunutzen. Im Betrieb mit einer der üblichen Steuerungen entsprechen die Ergebnisse aber nicht den gestellten



Forderungen. Da sich der Steuerstrom und damit auch der Arbeitsstrom zeitlich linear ändern, ist die Spannungsänderung von der Neigung jenes Kurventeils der gekrümmten Strom-Spannungs-Kennlinie abhängig, in dem sich gerade der Betriebspunkt befindet. Wenn sich die physikalische Zusammensetzung des Gases und damit die Filtercharakteristik ändert, so ergibt sich auch eine andere Spannungsänderung je Zeiteinheit, da die Verstellgeschwindigkeit am Steuergerät konstant ist. Damit ist aber die Geschwindigkeit einer Spannungserhöhung weder konstant noch in irgendeiner Weise festzulegen, auch nicht für ein und dieselbe Anlage.

Ausschlaggebend beim Abtasten der Durchschlaggrenze ist aber, daß die Geschwindigkeiten der Koronabildung an der Sprühelektrode und die der Ionisierung des Gases berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeit der Spannungssteigerung darf nicht einem Zufall überlassen sein, weil sonst die im Augenblick des Durchschlags anliegende Spannung weit höher sein kann als die Zündungsspannung, die einem Durchschlag entspricht, der sich aus der langsamen Ionendiffusion herleitet. Dadurch würde es notwendig, eine große Stufe für die anschließende Spannungsminderung zu wählen, was eine unliebsame Beunruhigung des Filterbetriebes zur Folge hätte.

Die Stromaufnahme eines Filters ist sehr unterschiedlich; sie kann im Bereich von 1:10 schwanken. Deshalb ist auch bei gleichem Steuerimpuls die größte der Spannungsstufen, mit der man sich von der Durchschlag-

grenze entfernt, nicht festgelegt. Bei kleiner Last genügt ein kürzerer Steuerimpuls, um die gleiche Spannungsstufe wie bei großer Last zu erzielen.

Diese Mängel lassen sich vermeiden, wenn die Verstellgeschwindigkeit für die Aussteuerung als Funktion der wechselnden Filterkennlinienkrümmung und Filterlast veränderlich ist. Wird ein stromsteuernder Transduktor mit konstanter Geschwindigkeit für die Änderung der Aussteuerung zur Spannungssteuerung mit herangezogen, so sind grundsätzliche Forderungen an das Elektrofilterverfahren nicht berücksichtigt.

Solche Anlagen werden notwendigerweise mit einer verhältnismäßig großen Durchschlagzahl je Zeiteinheit betrieben. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, daß beim Überschreiten einer bestimmten Durchschlaghäufigkeit der Abscheidegrad eines Elektrofilters von seinem Optimum absinkt. Andererseits ist mit einer linearen Spannungssteuerung die Möglichkeit gegeben, ein Filter auch mit geringen Durchschlagraten zu betreiben und bei optimalem Abscheidegrad die Gesamtanlage mechanisch zu schonen.

Wenn ein stromsteuernder Transduktor allen verfahrenstechnischen Anforderungen genügen soll, muß er mit einem Verfahren zur Spannungssteuerung, wie es z. B. mit Stelltransformatoren möglich ist, so kombiniert werden, daß eine konstante Spannungsänderungsgeschwindigkeit und freie Einstellbarkeit des Betriebsstromes bis Nennstrom möglich sind. Darüber wird später in einem weiteren Beitrag berichtet.

## ELMO-Kompressoren für höhere Systemdrücke

VON HEINRICH ENGELS

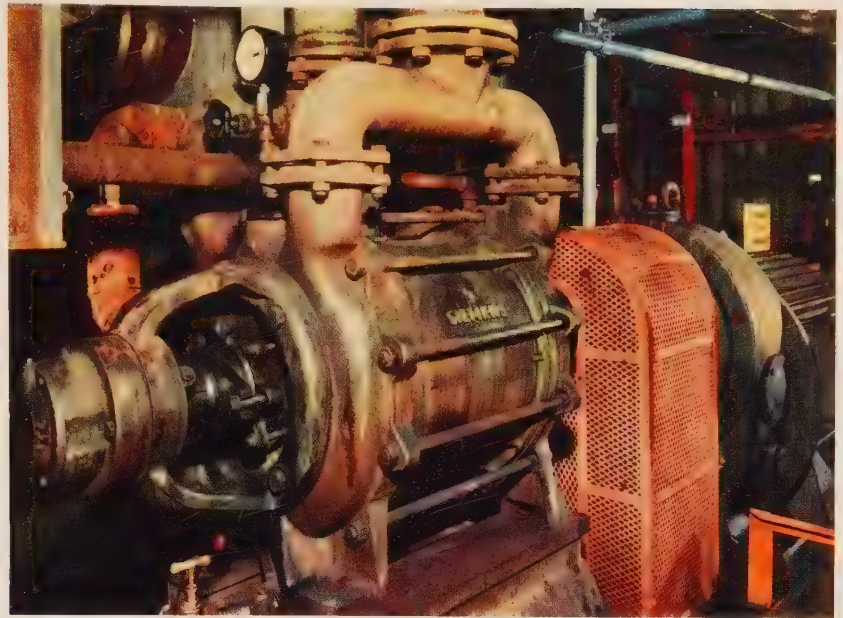
Als die Siemens-Schuckertwerke im Jahre 1905 die Idee einer sehr einfachen Vakuumpumpe zum Patent anmeldeten, dachte man daran, für die damals einzuführenden Drehstrom-Asynchronmotoren raschlaufende, direkt-angetriebene Arbeitsmaschinen zu schaffen. Die Wirkungsweise dieser Vakuumpumpen, die auch als Gebläse Verwendung fanden, mag durch den Wortlaut der Patentschrift [1] erklärt werden: »Flügelradpumpe mit exzentrisch in einem trommelförmigen Gehäuse rotierenden Treiborgan mit festen Flügeln, deren Außenenden in periodisch wechselnder Tiefe in einen durch die Fliehkraft entstehenden Flüssigkeitsring eintauchen, so daß bei geeigneter Lage und Form der Eingangs- und Ausgangsöffnungen für die einzelnen Zellen des Treib-

organs eine Wirkung nach Art der Kolbenpumpe eintritt, gekennzeichnet durch ein feststehendes Gehäuse, in dem der Flüssigkeitsring mit dem Treiborgan rotiert, zu dem Zwecke, eine einfache Anordnung der ganzen Pumpe zu erreichen«.

Flüssigkeitsringpumpen der beschriebenen Art erobernten sich als ELMO\*-Vakuumpumpen und -Gebläse ein weites Feld in der Verfahrenstechnik. Die ursprünglich als Vakuumpumpen konstruierten Maschinen eignen sich auch zum Verdichten von Gasen auf einen Enddruck von 2 bis 2,5 ata bei einem Ansaugdruck von etwa 1 ata.

\* Eingetragenes Warenzeichen

Bild 1 Doppeltwirkender  
ELMO-Kompressor für höheren  
Systemdruck in einem Chemiewerk.  
Die aufgenommene Leistung  
beträgt bis 215 kW



Zum Erzielen höherer Enddrücke wurden in neuerer Zeit ein- und zweistufige Kompressorreihen bereitgestellt [2]. Darüber hinaus hat die chemische Industrie mehr und mehr Bedarf an Kompressoren zum Fördern von Gasen, die mit einem Ansaugdruck von mehreren Atmosphären umgewälzt und dabei verdichtet werden sollen. Für diese Zwecke wurden Flüssigkeitsringkompressoren in doppeltwirkender Bauart (Bild 1) entwickelt; sie sind so robust, daß sie mit erhöhten Dreh-

zahlen bis zu einem Ansaugdruck von 4 ata und einem Verhältnis des Verdichtungsenddruckes zum Ansaugdruck bis 3 : 1 betrieben werden können.

Die doppeltwirkende Bauart ist für höhere Beanspruchung geeignet, weil die Wellen solcher Kompressoren lediglich durch das eingeleitete Drehmoment belastet sind [2]. Dabei entstehen keine merklichen Wellendurchbiegungen, so daß das Abdichten der Stopfbuchsen, das bei höheren Systemdrücken und damit verbundenen Wellenumfangsgeschwindigkeiten nicht ganz einfach ist, wesentlich erleichtert wird.

Für einen großen Teil der Betriebsfälle mit erhöhtem Anfangsdruck  $p_a$  eignen sich doppeltwirkende ELMO-Kompressoren (LPD-Reihe), deren geförderte Mengen  $Q$  bei 1 ata Ansaugdruck und den dazugehörigen Asynchron Drehzahlen  $n$  in Bild 2 zusammengestellt sind.

Aber nicht in allen Fällen, in denen die chemische Industrie aus Verfahrensgründen auf Flüssigkeitsringmaschinen zurückgreifen möchte, sind Kompressoren der LPD-Reihe brauchbar. Fortschritte in der theoretischen Durchdringung der Probleme der Flüssigkeitsringpumpen machen es jedoch möglich, mit Sonderausführungen auch außergewöhnliche Forderungen zu erfüllen.

Bild 3 zeigt die Anordnung, die zum Verdichten von 24000 Nm<sup>3</sup>/h Spaltgas von 8 auf 16 ata gewählt wurde. Die beiden außenliegenden Räder 1a und 1b sind parallel geschaltet und verdichten das mit 8 ata anfallende Gas auf etwa 11,3 ata. Das so verdichtete Gas wird dem in der Mitte befindlichen Rad 2 zugeführt und auf den Enddruck von 16 ata gebracht. Die auf beiden Seiten zwischen den Wellenstopfbuchsen und der Gaspumpe ange-

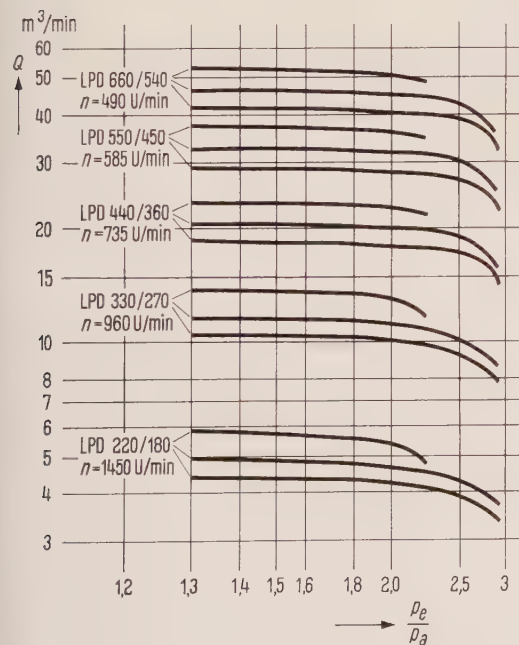


Bild 2 Angesaugte Gasmenge  $Q$  bei doppeltwirkenden ELMO-Kompressoren. Ansaugdruck 1 ata



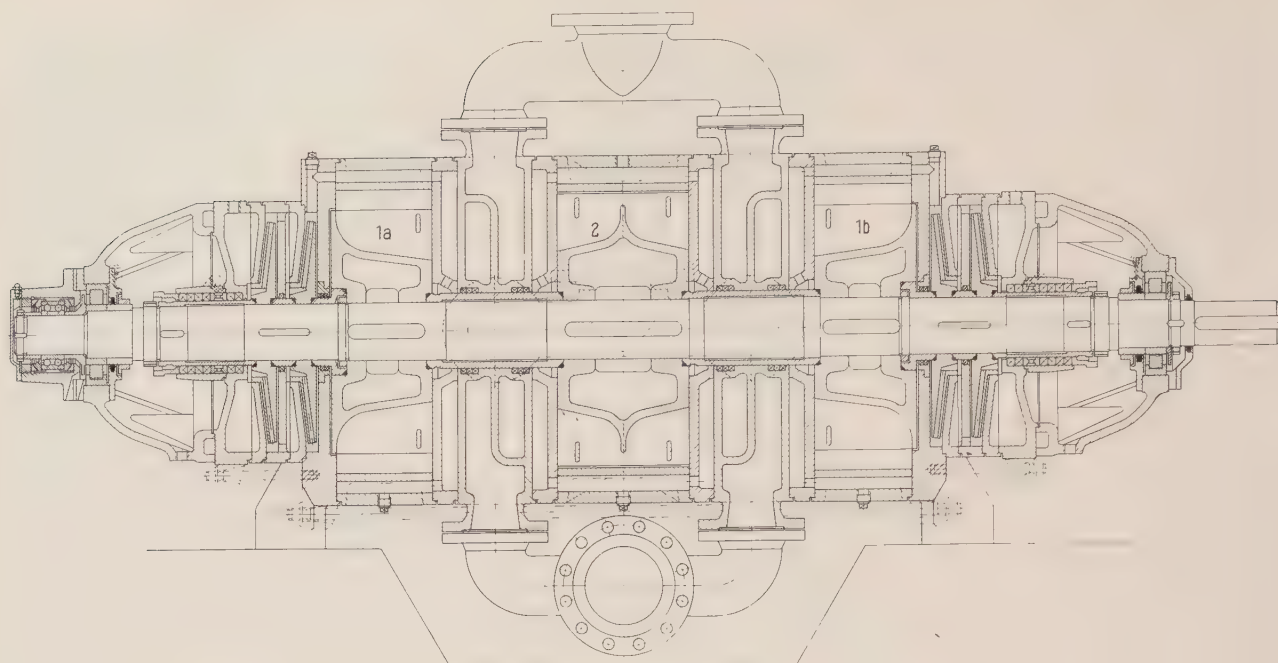


Bild 3 Schnitt durch einen zweistufigen ELMO-Kompressor für höheren Systemdruck. Der Läufer ist radial und axial entlastet

ordneten Kreispumpenräder dienen dazu, das für die Kühlung und die laufende Auffüllung der Wasserringe nötige Betriebswasser auf das Druckniveau des Kom-

pressors zu heben. Die Stopfbuchsen sind also lediglich mit Betriebswasser mäßigen Druckes beansprucht.

Die Leistungsaufnahme der Flüssigkeitsringpumpen wurde im Laufe der Jahre von zunächst Bruchteilen eines Kilowatt bis auf etwa 200 kW gesteigert. Das Verdichten der erwähnten  $24000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  von 8 auf 16 ata erfordert eine Leistung von etwa 1300 kW. Um bei großtechnisch unerprobten chemischen Verfahren das Wagnis einer Leistungssteigerung um den 6,5fachen Betrag (von 200 auf 1300 kW) zu verringern, wurde vorerst ein kleinerer Kompressor für etwa 420 kW gebaut (Bild 4). Die geplante 1300-kW-Maschine soll erst dann gebaut werden, wenn genügend Erfahrungen an dem 420-kW-Kompressor mit Spaltgasen, die während der Verdichtung teilweise polymerisieren, vorliegen.

Die Meßergebnisse am 420-kW-Kompressor bestätigten erneut die Zuverlässigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes [2, 3] für Flüssigkeitsringpumpen, obwohl dabei nur die Bedingungen der thermodynamischen Ähnlichkeit, der Newtonschen und der Froudeschen Ähnlichkeit zusammen eingehalten werden können, wogegen der Einfluß der nicht erfaßten Reynoldsschen Ähnlichkeit in Form einer Wirkungsgradaufwertung abzuschätzen ist.

Das Ähnlichkeitsgesetz besagt, daß alle Vorgänge der Verdichtung ähnlich verlaufen, wenn

$$k = \frac{p \cdot 2 g_n}{\gamma_n u^2} = \text{konst.}$$

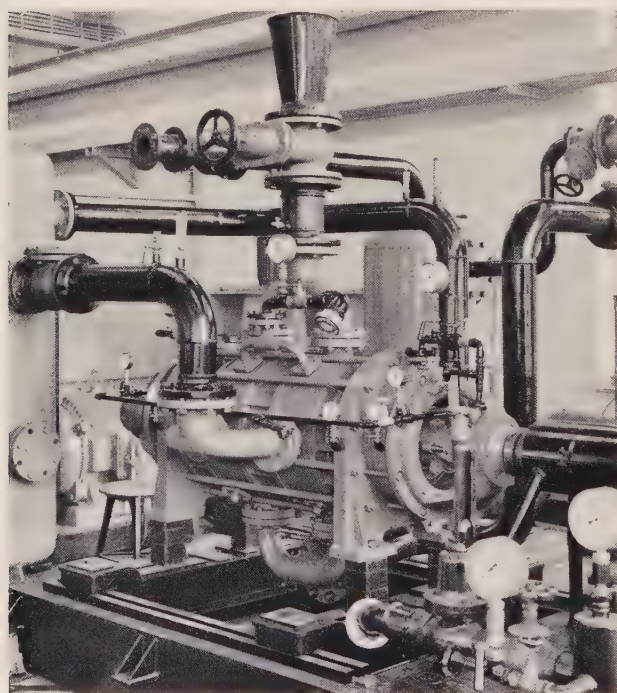


Bild 4 Spaltgaskompressor 420 kW auf dem Prüfstand. Die geförderte Gasmenge ( $8000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) wird von dem Ansaugdruck von 8 ata auf den Enddruck von 16 ata verdichtet

sowie die geometrische Ähnlichkeit eingehalten und das Verhältnis von Gasenddruck zu Gasansaugdruck konstant sind.

Hierbei bedeuten:

- $p$  Druck (z. B. Ansaugdruck) in  $\text{kp m}^{-2}$
- $\gamma_n$  Spezifisches Normgewicht der Betriebsflüssigkeit in  $\text{kp m}^{-3}$
- $g_n$  Normfallbeschleunigung in  $\text{m s}^{-2}$
- $u$  Umfangsgeschwindigkeit des Rades in  $\text{m s}^{-1}$

Die in Bild 5 eingetragenen Meßpunkte zeigen, daß die angesaugte Menge proportional  $p_a^{1/2}$  ist, wenn einerseits der erwähnte Wert  $k$  durch Einstellen der jeweils zugehörigen Drehzahl, andererseits das Druckverhältnis (Verhältnis von End- zu Ansaugdruck) konstant gehalten werden. Die Leistungsaufnahme  $P$  folgt unter denselben Bedingungen sehr genau dem theoretisch erwarteten Ausdruck:

$$P \sim p_a^{3/2}$$

Systematische Abweichungen der Meßpunkte von den theoretischen Potenzfunktionskurven sind nicht vorhanden. Das einfache Ähnlichkeitsgesetz ist demnach ein sicherer Wegweiser für die Auslegung von Flüssigkeitsringkompressoren vor der Ausführung und ermöglicht es, große Kompressoren modellähnlich zu prüfen, wenn die volle Leistung auf dem Prüfstand nicht ausgefahren werden kann.

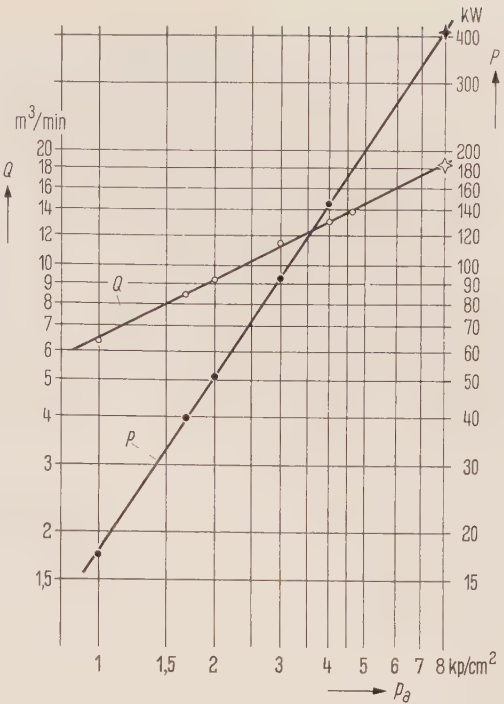


Bild 5 Gasmenge  $Q$  und aufgenommene Leistung  $P$  des 420-kW-Spaltgaskompressors, abhängig vom Ansaugdruck  $p_a$ . Bestätigung des Ähnlichkeitsgesetzes für Flüssigkeitsring-Gaspumpen

Schrifttum

- [1] Patentschrift Nr. 185789 vom 26. August 1905
- [2] Schnapper, P.: ELMO-Kompressoren in der chemischen Industrie. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 355 bis 359
- [3] Pfeleiderer, C.: Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg. 4. Auflage, 1955, S. 563

## Einfluß des Druckverhältnisses auf die Ausführung von ELMO-Vakuumpumpen

VON GERT HECHT UND KURT WILLY MUGELE

Das Absaugen und Verdichten feuchter, aggressiver, explosiver oder verunreinigter Gase und Dämpfe, die oft ölfrei bleiben müssen, stellt den Verfahrensingenieuer immer wieder vor die Frage nach dem geeigneten Verdichtersystem. Entscheidend ist hierbei große Betriebssicherheit bei geringer Wartung und Bedienung.

Es hat sich gezeigt, daß die nach dem Wasserring-Prinzip arbeitende ELMO\*-Gaspumpe dieser Forderung gerecht wird und deshalb – besonders in der chemischen Industrie – in zunehmendem Maße verwendet wird.

Der einfache Aufbau und die Wirkungsweise von ELMO-Gaspumpen sind schon früher beschrieben worden<sup>1)</sup>. Nachfolgend wird berichtet, welchen Einfluß das Druck-

verhältnis  $p_e/p_a$  auf die Ausführung von ELMO-Vakuumpumpen hat und wie die damit zusammenhängenden Probleme gelöst wurden.

### Ansaugdrücke bis 110 Torr (Druckverhältnis bis 7)

Hierbei kommt es besonders auf die Ausführung der Drucköffnungen in den Steuerscheiben an, die für den kleinsten wirtschaftlich erreichbaren Ansaugdruck ausgelegt werden. Um Überverdichtung und Wirbelverluste bei größeren Ansaugdrücken zu vermeiden, werden vor dem sichelförmigen Druckschlitz einige Bohrungen angebracht, und zwar entgegen der Drehrichtung des Laufrades (Bild 1). Diejenigen Bohrungen, die im Bereich des Ausschiebedruckes liegen, lassen das Gas leicht durchströmen, wogegen das auf der Rückseite der Steuerscheiben befindliche Wasser alle übrigen Bohrungen abschließt,

\* Eingetragenes Warenzeichen  
1) Schnapper, P.: Die ELMO-Gaspumpe und ihre Anwendung in der chemischen Industrie. Siemens-Zeitschrift 26 (1952) 196 bis 200



die sich noch in einem Bereich niedrigen Druckes befinden. Man erhält durch diese Anordnung also eine Art Wasserventil-Wirkung, die sich größenordnungsmäßig an Hand der Gleichung

$$\frac{Q_G}{Q_W} = \sqrt{\frac{\gamma_W}{\gamma_G}}$$

abschätzen läßt.

Hierin bedeuten:

- $Q_G$  Gasmenge, die durch die Bohrung strömt
- $Q_W$  Wassermenge, die durch die Bohrung strömt
- $\gamma_W$  Dichte des Wassers
- $\gamma_G$  Dichte des Gases

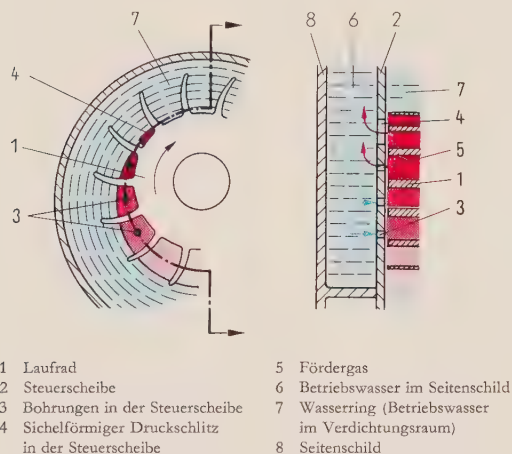
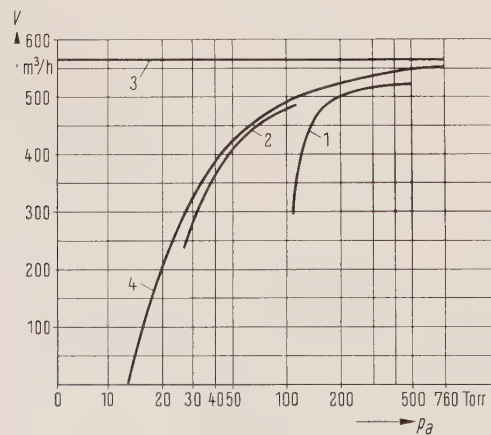


Bild 1 Wasserventil-Wirkung bei einer ELMO-Vakuumpumpe für Ansaugdrücke bis 110 Torr



- 1 Ansaugmenge  $V_{a1}$  einer ELMO-Vakuumpumpe für Ansaugdrücke bis 110 Torr
- 2 Ansaugmenge  $V_{a2}$  einer ELMO-Vakuumpumpe mit gleicher Radabmessung und Drehzahl wie bei 1 für Ansaugdrücke bis 30 Torr
- 3 Durch das Radvolumen der ELMO-Vakuumpumpe bestimmte Ansaugmenge  $V_R$
- 4 Physikalisch mögliche Ansaugmenge  $V_{ib}$  bei einer Temperatur des Betriebswassers von 15°C. Es gilt

$$V_{ib} = V_R \frac{p_a - p_{d15}}{p_a} \quad V_R \varphi$$

$p_a$  Ansaugdruck in Torr

$p_{d15}$  Dampfdruck in Torr bei einer Temperatur des Betriebswassers von 15°C

Bild 2 Ansaugmenge einer ELMO-Vakuumpumpe für 110 bzw. 30 Torr. Die Ansaugmenge der Vakuumpumpe für 30 Torr ist fast nur noch durch den Dampfdruck des Betriebswassers bestimmt

Setzt man die Werte für Wasser und Luft in die Gleichung ein, so ergibt sich, daß durch eine Bohrung bei gleicher Druckdifferenz etwa 30mal mehr Luft als Wasser strömt.

### Ansaugdrücke bis 30 Torr (Druckverhältnis bis 25)

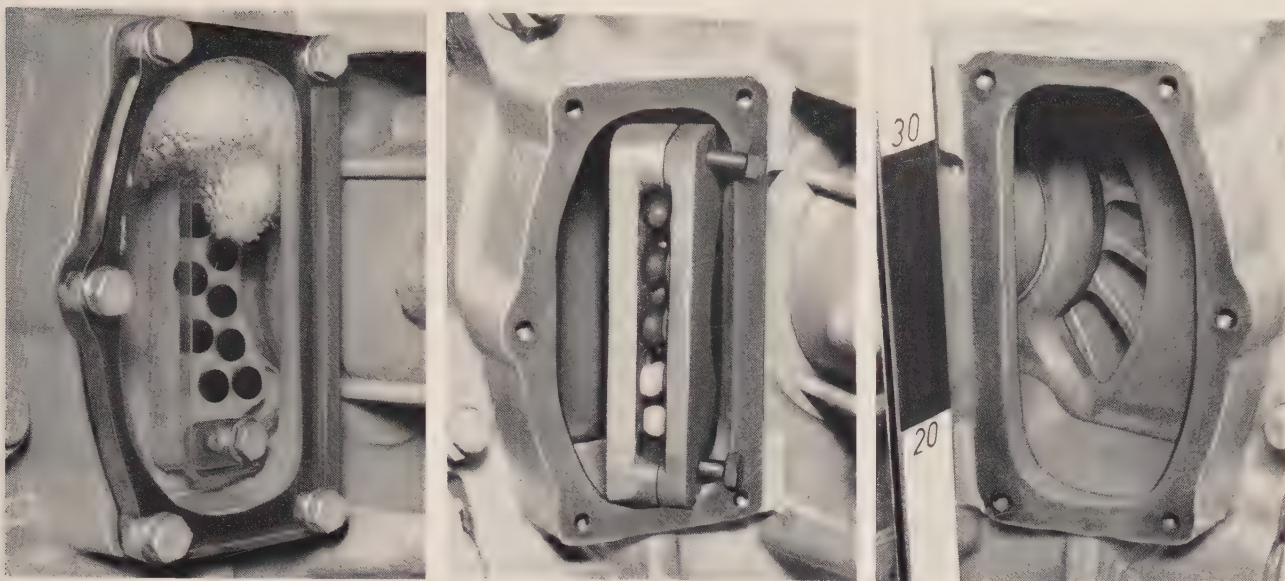
In diesem Bereich reicht die erwähnte Wasserventil-Wirkung nicht mehr aus. Es liegt deshalb nahe, durch Anordnung einer zweiten Stufe dafür zu sorgen, daß je Stufe wiederum nur ein Druckverhältnis von etwa 5 auftritt. Bei Ausführung zweistufiger Vakuumpumpen müßte man jedoch von der seit langem bewährten, einfachen und robusten Einrad-Bauweise abgehen. Die Einrad-Bauart bietet den Kunden einfachere Ersatzteilhaltung, bessere Besichtigungs- und Montagemöglichkeit sowie geringeren Raumbedarf.

Es wurde nun untersucht, wie die verschiedenen Einflußgrößen – Laufrad- und Gehäuseform, Ausbildung der Druck- und Saugöffnungen usw. – aufeinander abzustimmen sind, damit tatsächlich in einer Stufe das gewünschte hohe Druckverhältnis von etwa 25 sicher und wirtschaftlich hergestellt werden kann. Ferner wurde angestrebt, daß eine solche Pumpe auch bei kleineren Druckverhältnissen einwandfrei betrieben werden kann.

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Entwicklungsarbeiten hatten ein gutes Ergebnis. Wie Bild 2 zeigt, ist die Ansaugmenge einer ELMO-Einrad-Vakuumpumpe für Ansaugdrücke bis 30 Torr fast nur noch durch den Dampfdruck des Betriebswassers bestimmt, d. h., es werden Füllungsgrade  $V_{a2}/V_{ib} \approx 1$  erreicht.

Zu diesem günstigen Ergebnis hat die Anwendung und Weiterentwicklung des Kugelventiles<sup>1)</sup> mit beigetragen. Kugelventile haben sich seit vielen Jahren auch unter schweren Betriebsbedingungen bewährt. Bild 3a läßt die Arbeitsweise der Kugelventile erkennen. Da die Pumpe hier bei etwa 45 Torr Ansaugdruck arbeitet, reicht der sichelförmige Druckschlitz in den Steuerscheiben für das verdichtete Gas nicht mehr aus. Die im Bild sichtbaren Gasblasen deuten darauf hin, daß sich eine Kugel des Ventiles vom Ventilsitz abgehoben hat, so daß das Gas ohne größere Überverdichtung auch durch die Ventilbohrung ausströmen kann. Bei größeren Ansaugdrücken werden sich auch die weiter unten sichtbaren Ventilkugeln von ihren Sitzen abheben und so eine Anpassung der Drucköffnung an das Druckverhältnis bewirken.

Bei der Betrachtung von Bild 3a könnte der Eindruck entstehen, daß die Ventile, besonders die Ventilkugeln, einem Verschleiß unterworfen und deshalb gelegentlich auszuwechseln sind. Hierzu läßt sich aber die überraschende Feststellung machen, daß bei ungefähr gleichbleibendem Ansaugdruck ein etwaiger Verschleiß der Ventilkugeln keinen Einfluß auf die Leistung oder Lebensdauer der ELMO-Vakuumpumpe hat. Außerdem kann aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung der Ventil-



a Kugelventile bei 45 Torr Ansaugdruck

b Ausführung mit von außen zugänglichen Kugelventilen (Deckel abgenommen)

c Nach Abschrauben eines Deckels kann der Zustand des Laufrades überprüft werden

Bild 3 Neueste Ausführung einer ELMO-Vakuumpumpe für Ansaugdrücke bis 30 Torr

werkstoff für jeden Betriebsfall zweckentsprechend gewählt werden.

Ein dauerndes Wechseln des Ansaugdruckes unter schweren Betriebsbedingungen kann u. U. einen Verschleiß der Ventilkugeln und damit eine allmähliche Minderleistung der Pumpe bewirken. Um auch derartigen Fällen gerecht zu werden, sind die Ventile der neuesten Ausführung einer ELMO-Vakuumpumpe von außen zugänglich (Bild 3b). Die Ventile sind nach Abschrauben der Deckel leicht auszuwechseln und zu über-

wachen. Auch über den Saugschlitz sind derartige Deckel angebracht. Werden die Deckel entfernt, so kann der Zustand der Innenteile ohne nennenswerten Zeitaufwand geprüft werden (Bild 3c). Vor allem ist es möglich, das Laufrad, die Steuerscheiben und den Mittelkörper zu besichtigen sowie die wichtigen Spalte zwischen dem Laufrad und den Steuerscheiben zu messen. Durch diese sehr einfache Kontrollmöglichkeit wird die allgemeine Betriebsüberwachung erleichtert und die Betriebssicherheit erhöht.

## Anwendung der elektrischen Glimmentladung zur Vorbehandlung von Polyäthylen

VON HEINZ FRÖHLICH

Polyäthylen verhält sich infolge des neutralen und unpolaren Aufbaues seiner  $\text{CH}_2$ -Kettenmoleküle gegenüber den meisten Stoffen chemisch völlig indifferent. Diesem Umstand verdankt es seine allgemein verbreitete Anwendung als Verpackungsmaterial, Textilersatz, als Rohstoff für die Herstellung von Haushaltsgeräten usw., weist jedoch aus dem gleichen Grund auch eine sehr schlechte Benetzbarkeit und Haftfähigkeit gegenüber anderen Stoffen auf. Es ist daher nicht ohne weiteres möglich, Gegenstände aus Polyäthylen ohne Vorbehandlung mit fest haftenden Aufdrucken zu versehen.

Die hierfür bekannten Verfahren laufen alle auf eine Oxydation der Polyäthylenoberfläche hinaus. Es werden dabei Carboxyl-Gruppen, OH-Gruppen und Radikale gebildet, die mit den in der Druckfarbe enthaltenen polaren Gruppen reagieren und eine feste Bindung eingehen können.

Chemisch indifferente Stoffe sind nur angreifbar, wenn die beteiligten Atome eine entsprechende Aktivierungsenergie enthalten oder mit sich führen. Unter Ausnutzung dieser Tatsache haben zwei Verfahren technische Bedeutung für die Vorbehandlung erlangt: das Hoch-



spannungs-Sprühverfahren und das Kreidelsche Flammverfahren.

Das Hochspannungs-Sprühverfahren eignet sich für Polyäthylen-Folien, die in einer Hochspannungssprühentladung in Luft unter Atmosphärendruck behandelt werden, wobei die Oberfläche einige Sekunden der Einwirkung des angeregten oder ionisierten Sauerstoffes und Ozones ausgesetzt wird. Für Folien hat sich dieses Verfahren allgemein durchgesetzt, da die notwendigen Spannungen wegen der möglichen geringen Elektrodenabstände bequem beherrschbar sind (etwa 10 kV).

Bei Polyäthylen-Körpern (z.B. Flaschen) sind geringe Elektrodenabstände im allgemeinen nicht mehr möglich. Hier geschieht die Vorbehandlung nach dem Kreidelschen Flammverfahren, wobei die Oberfläche unter der Einwirkung einer Gasflamme oxydiert. Dabei muß die Vorbehandlungsdosis sehr sorgfältig eingehalten werden, eine Forderung, die z. B. bei unregelmäßig geformten Körpern sehr problematisch ist.

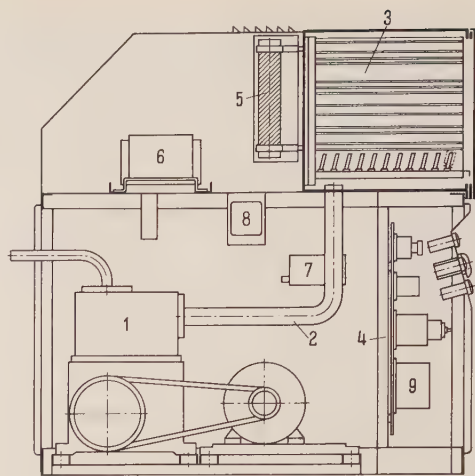
Es besteht daher in der polyäthylen-verarbeitenden Industrie Interesse an einem Verfahren, das die Vorbehandlung beliebig geformter Körper unter genauer Dosierung ermöglicht. Hierfür boten sich Niederdruckgasentladungen, und unter diesen besonders die Niederdruckglimmentladung an. Trotz des etwa um drei Größenordnungen geringeren Luftdruckes wird mit diesem Verfahren ein ausgezeichnetes Behandlungsergebnis mit einer Behandlungsdauer von wenigen Sekunden erzielt.

### Vorbehandlung in einer Niederdruckglimmentladung

Legt man an zwei ebene, zueinander parallele Elektroden eine Wechselspannung von 200 bis 400 V, so entsteht bei einem Luftdruck von 0,5 Torr eine den ganzen Raum zwischen den Elektroden ziemlich gleichmäßig ausfüllende Glimmentladung, wobei sich die Brennspannung und die Stromdichte (1 bis 1,5 mA/cm<sup>2</sup>) bei Elektrodenabständen zwischen etwa 5 und 20 cm nicht nennenswert ändern. Da die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen in der Größenordnung von 0,1 mm liegt, schmiegt sich die Glimmentladung jeder beliebigen Form eines zwischen die Elektroden gebrachten Gegenstandes an.

Die Behandlungsdosis, die bei konstantem Sauerstoff-Partialdruck dem Produkt aus Stromdichte und Zeit proportional ist, ist beliebig einstellbar und reproduzierbar. Die Körper werden dabei praktisch nicht erwärmt.

Bei 0,5 Torr Luftdruck und der erwähnten Stromdichte genügt für reines Hochdruckpolyäthylen eine Behandlungszeit von 3 s, um beim anschließenden Bedrucken oder Lackieren eine gute Haftung zu erzeugen. Eine Behandlung während 6 bis 8 s ermöglicht bereits, das Material mehrere Wochen zu lagern und dann erst zu bedrucken. Bei Niederdruckpolyäthylen und Polypropylen betragen die entsprechenden Werte 12 bis 15 s. Die



- |   |                         |
|---|-------------------------|
| 1 Vakuumpumpe   | 5 Vorwiderstände        |
| 2 Pumpleitung   | 6 Transformator         |
| 3 Behandlungskammer   | 7 Magnetventil          |
| 4 Rahmen mit den elektrischen Geräten für den selbsttätigen Arbeitsablauf | 8 Pumpzeitrelais        |
|   | 9 Behandlungszeitrelais |

Bild 1 Aufbau des Gerätes PKB 1 zur Behandlung von Polyäthylenkörpern

leichtere Oxydierbarkeit des Hochdruckpolyäthylens ist wahrscheinlich dadurch begründet, daß Hochdruckpolyäthylen im Vergleich zu Niederdruckpolyäthylen sehr viel mehr Seitenketten und Verzweigungen enthält, die bei Elektronenbeschuß leicht zu Brüchen neigen. Für diese Erklärung spricht auch, daß in dem aus Hochdruckpolyäthylen herausgeschlagenen Gas wesentlich mehr Kohlenwasserstoffe enthalten sind als in dem aus Niederdruckpolyäthylen stammenden Gas, das fast ganz aus Wasserstoff besteht.<sup>1)</sup>

Die erforderliche Dosis ist außerdem von der Zusammensetzung der Druckfarbe abhängig. Es gibt Farben, die eine Verkürzung der angegebenen Zeiten um etwa den Faktor 3 ermöglichen.

Die trotz des geringen Luftdruckes intensive Wirkung der Glimmentladung kann man mit Hilfe folgender Abschätzung verstehen:

Die Gegenstände unterliegen erstens der Einwirkung von Elektronen verhältnismäßig hoher Energie (etwa 10 eV). Bei der angegebenen Stromdichte treffen in einer Sekunde 10<sup>15</sup> bis 10<sup>16</sup> Elektronen auf einen Quadratcentimeter des vorzubehandelnden Körpers. Das ist ausreichend, um in der angegebenen Zeit genügend viele Atome bzw. Moleküle auf der Oberfläche anzuregen und eine große Zahl von Radikalen zu schaffen. Betrachtet man die Bindungsenergien zwischen den Atomen der Moleküle (C-C etwa 3,5 eV, C-H etwa 4,3 eV, H-H etwa 4,5 eV), so wird verständlich, daß bei zu großer Behandlungsdosis sogar bereits eine merkliche Vernetzung der Oberflächenmoleküle stattfindet.

1) Schumacher, K.: Über die Veränderung von HD- und ND-Polyäthylen durch Röntgenbestrahlung. Kolloid-Zeitschrift 157 (1958) 16 bis 27

In einem Plasma ist die Anzahl der auf die Oberfläche auftreffenden Ionen gleich der Anzahl der auftreffenden Elektronen, also auch  $10^{15}$  bis  $10^{16}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , da sich der Körper praktisch nicht aufladen kann. Die Konzentration der angeregten Sauerstoffmoleküle liegt etwa zwei Größenordnungen über der Ionenkonzentration, so daß ein Quadratzentimeter der Oberfläche in einer Sekunde von mindestens  $10^{17}$  aktivierten Sauerstoffteilchen getroffen wird. Bei  $10^{15}$  bis  $10^{16}$   $\text{CH}_2$ -Molekülen je Quadratzentimeter muß daher die Oberfläche in kurzer Zeit oxydiert sein.

Damit ist auch das Verschwinden etwaiger Oberflächenladungen in der Glimmentladung verständlich. Dieser Effekt führt beim Belüften der Vakuumkammer zu einer merklichen Entstaubung der Oberflächen, weil entladene Staubteilchen weniger fest haften und durch die Luftbewegung leicht weggeführt werden können.

Da die Gaszusammensetzung in der Behandlungskammer nach Wunsch verändert werden kann, bieten Glimmentladungen die Möglichkeit zu weiteren Untersuchungen der für die Vorbehandlung wirksamen Faktoren, die noch keineswegs ganz erforscht sind. Zwar steht die Oxydation als wesentliche Bedingung fest, denn in einer reinen Wasserstoffatmosphäre ist kein Behandlungsergebnis erzielbar, wogegen reiner Sauerstoff eine, wenn auch für den technischen Prozeß uninteressante Verkür-

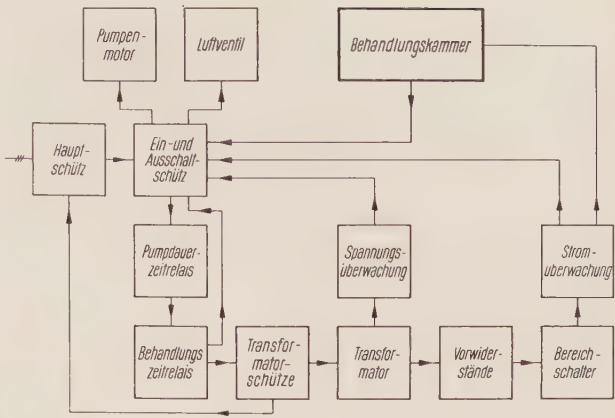


Bild 3 Blockschaltung des Gerätes PKB 1

zung der Behandlungszeit gegenüber Luft ergibt. Warum aber, um nur ein Beispiel zu nennen, nach der Vorbehandlung erzeugte Reibungselektrizität den Behandlungseffekt vernichtet und warum sich Niederdruckpolyäthylen in dieser Beziehung als besonders empfindlich erweist, ist z. Z. noch nicht geklärt, zumal der Oxydationsgrad dadurch nicht verändert wird.

Das Polyäthylenkörper-Behandlungsgerät PKB 1

Zur chargenweisen Vorbehandlung von Polyäthylenkörpern wurde ein Gerät geschaffen, das sich durch große Einfachheit, einen geringen vakuumtechnischen Aufwand sowie durch vollkommen selbsttätigen Arbeitsablauf auszeichnet.

Bild 1 zeigt den Aufbau des Gerätes und seine wesentlichen Teile: Von einer Vakuumpumpe (1) führt eine Pumpleitung (2) zur Behandlungskammer (3), die einen Inhalt von 125 l hat und etwa 500 Flaschen mit einer Länge bis zu 68 mm und 30 mm Durchmesser oder etwa 300 Tuben oder etwa 30 Literflaschen fassen kann. Unter der Behandlungskammer befinden sich die elektrischen Schaltgeräte (4), hinter ihr die Vorwiderstände (5) für die Glimmentladung und der Transformator (6), der eine Wechselspannung von etwa 650 V (Effektivwert) liefert. Die zu behandelnden Flaschen werden auf Stifte gesteckt (s. Bild 2), die auf Messingblechen befestigt sind und deren Abstand dem jeweiligen Flaschendurchmesser angepaßt werden kann.

Die Bleche können in fünf verschiedenen Abständen je nach Länge der Flaschen in die Führungsschlitze der Isolierstoffseitenwände eingeschoben werden. Die elektrische Spannung wird den Blechen über Kontakteleisten an der Rückwand der Behandlungskammer zugeführt. Schablonen an den Vorderkanten der Seitenwände sorgen für die richtige Polarität der Bleche bei den einzelnen Abständen. Das Gerät hat einen mittleren Leistungsbedarf von etwa 2,5 kW. Bild 3 zeigt die Blockschaltung.



Bild 2 Einsetzen von Polyäthylenkörpern in die Behandlungskammer des Gerätes PKB 1





Bild 4 Das Innere der Behandlungskammer während der Glimmentladung

Der Arbeitsablauf wird durch das Schließen der Behandlungskammer ausgelöst; nach etwa 80 s öffnet sich

die Tür wieder zum Auswechseln der Charge. Überwachungsgeräte für Spannung und Strom innerhalb der Behandlungsstrecken verhindern unbemerkte Fehlbehandlungen, da die Charge bei Störungen nur nach Ausschalten des Hauptschalters vom Gerät freigegeben wird. Eine Gefährdung des Betriebspersonals durch elektrische Spannungen wird durch Verriegelungen verhindert, die bei Störungen das Ausschalten des Hauptschalters veranlassen. Der Arbeitsablauf läßt sich mit Hilfe von Kontrollampen überwachen, die gleichzeitig die Fehlerortung erleichtern.

Bild 4 zeigt das Innere der Behandlungskammer während der Glimmentladung.

Setzt man für das Auswechseln der Charge, also der bereits bestückten Bleche, 30 bis 40 s an, so ergibt sich ein Behandlungssturnus von ungefähr 2 min. Damit ist während einer Stunde ein Durchsatz von etwa 15000 Flaschen bis 68 mm Länge und 30 mm Durchmesser, oder von etwa 9000 Tuben oder 900 Literflaschen möglich.

Seit etwa einem Jahr werden in mehreren Werken der Kunststoffe verarbeitenden Industrie derartige Vorbehandlungsgeräte verwendet. Sie haben sich bisher zur Zufriedenheit bewährt.

## Elektrischer Korrosionsschutz

Gesichtspunkte zur Planung und Ausführung

VON ADALBERT SPERLING

### Korrosion und Korrosionsschutz, Wirkungsweise des Elektrischen Korrosionsschutzes

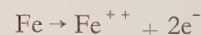
Die Verhütung oder Minderung der Korrosion von Bauwerken und Teilen – hauptsächlich aus Stahl – in Wasser oder nassem Boden ist von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Über die erfolgreiche praktische Anwendung elektrochemisch wirkender Korrosionsschutzverfahren wird seit langer Zeit berichtet [1]. In den letzten Jahrzehnten wurden wichtige Beiträge zur Aufklärung der Grundlagen bekannt, und die international als kathodischer Korrosionsschutz bezeichneten Verfahren treten auf zahlreichen Anwendungsgebieten immer stärker hervor [2, 3, 4, 5, 6].

Die nachfolgende Übersicht beschränkt sich auf den kathodischen Schutz mit Fremdstrom, der hier vereinfacht Elektrischer Korrosionsschutz (EKS) genannt wird.

Die Korrosion von ungeschütztem Stahl, umschlossen von Wasser oder feuchtem Boden, ist bei höherer elektrischer Leitfähigkeit des umschließenden Mediums und bei dessen natürlichem Sauerstoffgehalt bedeutend.

Der Sauerstoff wirkt als Depolarisator und begünstigt die elektrische Spannung zwischen Lokalkathoden und -anoden; die hohe elektrische Leitfähigkeit bedingt die entsprechend hohen Korrosionsströme. Makroelemente, gebildet aus größeren Teilflächen mit unterschiedlichem elektrochemischem Zustand, üben zusätzliche Einflüsse aus.

Die Brutto-Korrosionsreaktion besteht – vereinfacht dargestellt – aus der anodischen Teilreaktion der Eisenauflösung



und aus der kathodischen Reaktion der Sauerstoffreduktion:

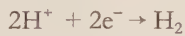


Bild 1 zeigt, daß durch Überlagerung eines Stromes von außen der Ablauf der vorgenannten Reaktionen entscheidend beeinflusst werden kann. Zwei Metallkörper A (Anode) und K (Kathode) berühren den lufthaltigen Elektrolyten. Eine weitere Elektrode E ist an einen

Spannungsteiler angeschlossen, der es ermöglicht, zwischen der Elektrode  $E$  und den Metallkörpern  $A$  und  $K$  Ströme unterschiedlicher Größe und Richtung einzustellen. Mit einer Bezugselektrode wird das Potential an der Phasengrenze von  $A$  bzw.  $K$  gegen den Elektrolyten nahezu leistungslos gemessen. Die Messungen ergeben für den anodischen Teilstrom die Kurve 1, für den kathodischen Teilstrom die Kurve 2 und als Summe aus den Kurven 1 und 2 die Kurve 3.

Der besonders gekennzeichnete Stromdichtewert  $I_{AR}$  der Kurve 1 ist der beim Ruhepotential  $U_R$  – also ohne überlagerten Strom – sich einstellende Korrosionsstrom der natürlichen anodischen Eisenauflösung. Er ist ein Maß für die Korrosionsgeschwindigkeit.

Durch einen eingepprägten, kathodisch wirkenden (nämlich in die Metallkörper vom Elektrolyten her eintretenden) Strom ist zwangsläufig eine Minderung oder Aufhebung der die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmenden anodischen Stromdichte  $I_A$  erreichbar. Dadurch wird die kathodische Stromdichte  $I_K$  in weitem Bereich kaum beeinflusst. Sie ist vor allem durch Umstände der Belüftung bzw. der Sauerstoffdiffusion festgelegt. Erst bei sehr beträchtlicher überlagerter Stromdichte und damit zusammenhängender Potentialabsenkung tritt eine Zunahme der kathodischen Stromdichte ein. Der kathodische Vorgang verläuft dann schließlich als Reaktion der Kationenabscheidung, z. B. der Wasserstoff-erzeugung:



Für Verhältnisse im technischen Maßstab und vorzugsweise zum Schutz gegen die natürliche Korrosion von Stahl in korrosionsgefährdendem Wasser und Boden wurde der Elektrische Korrosionsschutz entwickelt, dessen Ausführung anhand Bild 2 erläutert wird:

Das Schutzobjekt im Wasser oder im nassen Boden wird als metallverbundene Einheit mit einem Kabel an die negative Anschlußklemme eines netzgespeisten Gleichrichters angeschlossen. Mit der positiven Klemme wird eine im Wasser aufgehängte oder am Boden ausgelegte Graphitelektrode verbunden. Entsprechend den Regeln der Stromausbreitung in weiten Räumen geht der Strom praktisch zu allen Flächenteilen des Schutzobjektes, die mit dem leitenden Wasser oder Boden Berührung haben, und kehrt über das Kathodenkabel zum Gleichrichter zurück. Der ins Schutzobjekt eintretende Strom erreicht in Zusammenhang mit veränderten Potentialverhältnissen hauptsächlich die folgenden praktisch interessierenden Wirkungen:

- a) Schwächung oder Aufhebung der die anodische Korrosion verursachenden anodischen Lokalelement- bzw. Makroelementströme
- b) Reduktion des die Korrosion begünstigenden Sauerstoffs vor dem Schutzobjekt
- c) (Geringe) Anhebung des pH-Wertes
- d) Bildung von Deckschichten

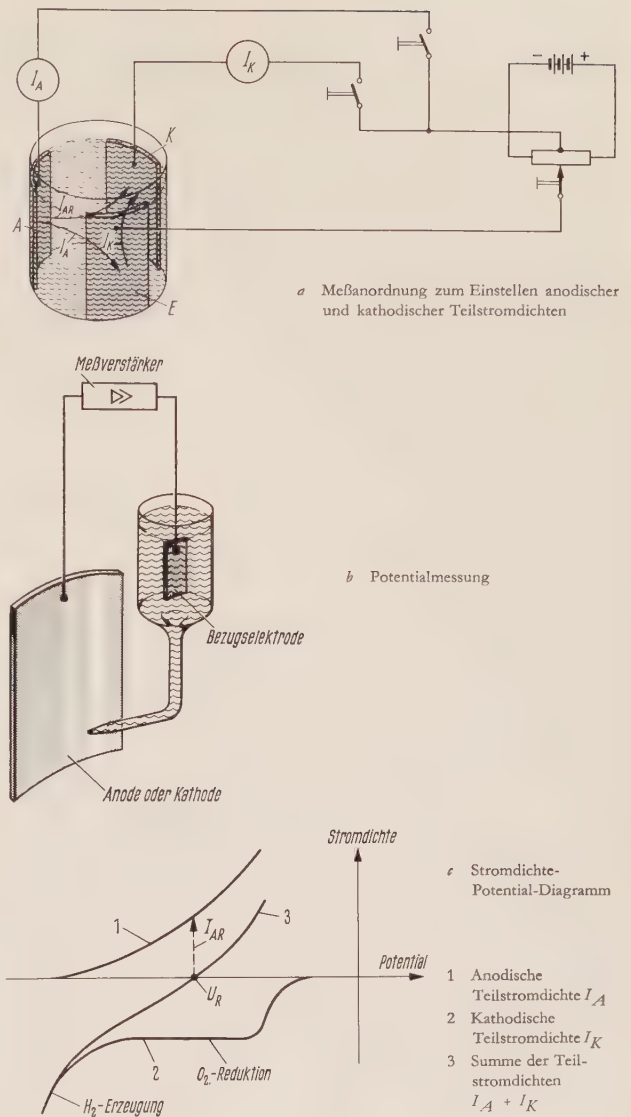


Bild 1 Messung von Stromdichte-Potential-Diagrammen

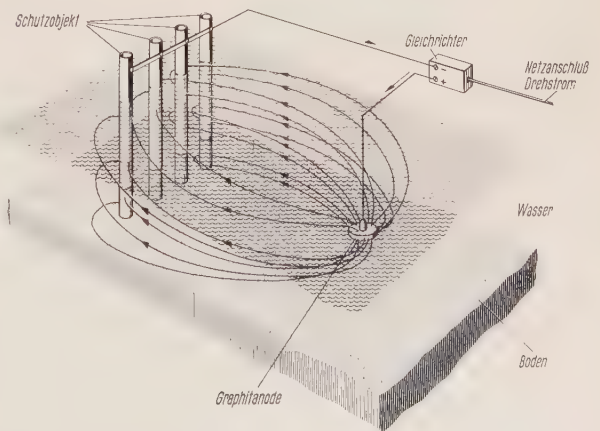


Bild 2 Grundsätzliche Darstellung des Elektrischen Korrosionsschutzes



### Bemessung des Schutzstromes. Streuströme

Für den Grad der Korrosionsschutzwirkung ist die Stromdichte (in mA/m<sup>2</sup>) am Schutzobjekt und damit das mit ihr zusammenhängende Potential des Schutzobjektes gegen das umgebende Medium bestimmend. Die vollständige Aufhebung der Korrosion wird im allgemeinen – praktisch und vor allem wirtschaftlich gesehen – nicht in Betracht kommen. Sie würde eine unendliche Lebensdauer des zu schützenden Objektes ergeben. Es ist nützlich, sich zu vergegenwärtigen, daß ein erreichter bestimmter Bruchteil der Korrosionsgeschwindigkeit das entsprechende Vielfache an Lebensdauer bedingt. An Bauteilen oder an größeren Bauwerken werden Ungleichmäßigkeiten der Schutzstromdichteverteilung häufig unvermeidlich sein.

Der spezifische elektrische Widerstand des Bodens, Wassers usw. ist meistens diejenige Einflußgröße, die die benötigte Schutzstromdichte grundlegend bestimmt. Diese Größe ist auch im allgemeinen verhältnismäßig einfach meßbar. Bild 3 zeigt grobe Richtwerte für die Stromdichte beim Elektrischen Korrosionsschutz von Stahl. Wenn sich sehr kräftige Deckschichten auf dem Schutzobjekt ausbilden, sind – namentlich bei höheren Stromdichten – Abschläge beim Errechnen des Stromes zulässig. Ein sehr ungleichmäßiges Schutzstromfeld bedingt umgekehrt einen erhöhten mittleren Schutzstrombedarf. Auch für stark bewegtes und belüftetes Wasser ist ein hoher Wert des Schutzstromes anzusetzen, u. U. mit einem Zuschlag.

Das Zusammenwirken von Isolierung und Anstrich mit dem Elektrischen Korrosionsschutz ist grundsätzlich unbedenklich und ist oft die wirtschaftlich vorteilhafteste

Lösung. Wenn die isolierende Bedeckung des Schutzobjektes bis zu dessen Einbettung in den feuchten Boden bzw. ins Wasser oder in den anschließenden Betriebsjahren Verletzungen, Aufweichungen usw. erfahren hat, wird der Schutzstrom alle solche korrosionsgefährdeten Stellen entsprechend den Regeln der Stromausbreitung im Elektrolyten zuverlässig erreichen und schützen.

Isolierung und Anstrich können als scheinbare Verminderung der wirksamen Oberfläche des Schutzobjektes berücksichtigt werden. In der Praxis rechnet man gern mit Faktoren, die ausdrücken, welcher Bruchteil der zu schützenden Fläche durch Anstrich oder Isolierung nicht abgedeckt ist, also Schutzstrom benötigt. Dabei wird nicht festgelegt, ob der Strom über eine Widerstandsschicht gleichmäßig verteilt über die ganze Fläche oder durch Poren und Löcher bestimmter Größe und Verteilung inmitten einer besseren Isolierung bis zur Oberfläche des Schutzobjektes gelangt. Für mehrfach gestrichene oder mit Bitumen o. ä. belegte Objekte im Wasser kann auf Zeit überschlägig mit einem Faktor zwischen 0,05 und 0,40 gerechnet werden; für bituminös bewickelte, in Erde verlegte Objekte liegt der Faktor zwischen 0,001 und 0,05. Beispielsweise ist unter günstigen Umständen bei einfachem bituminösem Schutz von 4 mm nach mehrjähriger Durchfeuchtung 0,5 % vom Strombedarf für das nackte Rohr anzusetzen.

Die Bemessung einer Anlage für Elektrischen Korrosionsschutz in Anlehnung an die vorstehenden Hinweise kann unzureichend sein, wenn – bisweilen ohne Wissen des Anwenders – das Schutzobjekt metallleitende Verbindung zu anderen in Erde verlegten Dingen, besonders zu

Kabelmänteln, Erdern usw. hat. Grundsätzlich sollte das Schutzobjekt von den nicht vom Schutz zu erfassenden Rohrrecken, Behältern usw. durch geeignete Isolierflansche o. ä. dauerhaft getrennt sein. Eine Verbindung zu Erdern, z. B. Blitzschutzern, ergibt sich manchmal überraschend über Lüftungsrohre und Dachrinnen. Die mit einem Schutzobjekt metallisch verbundenen Gehäuse von Motoren und anderer elektrischer Geräte sind meistens entsprechend VDE 0100 zur Verhütung gefährlicher Berührungsspannungen bei Isolationsdefekten über den Nulleiter des Speisekabels mit Erde oder dem Wasserrohrnetz verbunden. Die metallene Weiterverbindung zwischen dem Nulleiter und den verschiedenen Erdern und anderen meistens nackten Rohrsträngen ist im Interesse

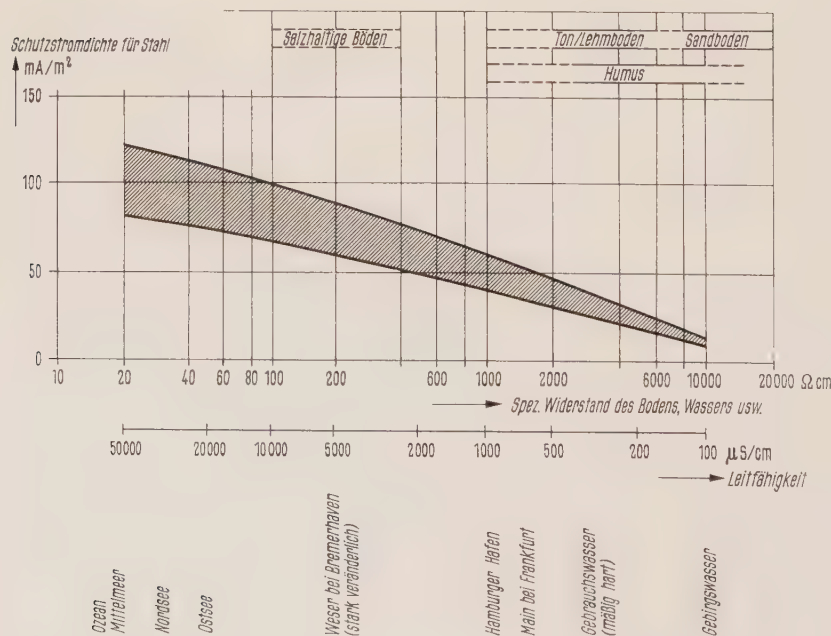


Bild 3 Richtwerte der Schutzstromdichte für Stahl ohne Anstrich bzw. Isolierung

günstiger Erdung und Gefahrenminderung in vielen Arten üblich und nachträglich meistens nicht mehr sicher festzustellen oder gar zu trennen.

Besonders für Schutzobjekte mit guter Isolierung bedeutet das Zusammenschalten mit anderen in Erde verlegten nackten Objekten einen sehr erheblichen Mehrbedarf an Schutzstrom. Ob dieser wirtschaftlich gerechtfertigt ist, muß im Einzelfall untersucht werden. Durch das Verbinden eines beispielsweise ausgedehnten, gut isolierten Schutzobjektes mit anderen großen nackten Objekten im Erdreich kann die günstige Verteilung des Schutzstromes besonders auch auf größere Entfernung beeinträchtigt sein. Anstelle einer Nullung kann – vor allem bei neuen Anlagen – die Fehlerstromschutzschaltung nach VDE 0100 § 13N angewendet werden. Sie entspricht den Forderungen des Berührungsschutzes und ermöglicht das Abtrennen des Schutzobjektes von anderen in der Erde liegenden ausgedehnten Metallobjekten.

Der Anschluß eines Schutzobjektes an erforderliche Blitzschutzterder ist u. U. mit Überspannungsschutzgeräten möglich. Diese sorgen bei normalen Verhältnissen für die Trennung zwischen Schutzobjekt und Erder. Bei Gewitter oder Auftreten hoher Spannung aus anderer Ursache wird die isolierende Strecke, wie es notwendig ist, leitend überbrückt.

Es ist noch die Behinderung und mögliche Unterbrechung der Schutzströme durch schlechtleitende Zwischenräume oder isolierende Schirme oder dgl. zu erwähnen. Schichten aus trockenem Sand oder Fels, Schotterdämme, auch Teerpappen usw. können den Strom zum kathodischen Schutz sperren oder behindern. In einigen Fällen kann man die Schwierigkeiten durch entsprechende Anordnung der Anoden – gegebenenfalls auch in ihrer Höhenlage – mindern.

Durch verbesserte Anlagentechnik, auch durch Wegfall älterer Gleichstromnetze sind die für Korrosionsfragen maßgebenden Gleichstromstreuströme immer seltener zu erwarten. Eine gewisse Rolle spielt jedoch auch heute noch die Einflußzone von Gleichstromschienenbahnen. In dem einfachen Fall: Fahrschiene ist minus, Oberleitung ist plus, kann bei geschweißten Rohrsträngen das in sich metallverbundene Rohrnetz in namhaften Teilen, besonders in der Nähe der Bahnstrecken, Streuströme in solcher Richtung aufnehmen, daß nicht nur keine Korrosionsgefährdung, sondern vielmehr die Wirkung eines gewissen kathodischen Schutzes besteht. Korrosionsgefährdungen in der Gegend der Rückleiterkabelanschlüsse lassen sich dann vielfach recht einfach durch Kabelverbindungen zwischen Rohrnetz und Schienen beseitigen (Streustromdrainage) [7].

Bild 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung zwischen Schiene und Rohrnetz an einer Straßenkreuzung in einer Großstadt eines Industriegebietes. Aus dem Verlauf über 24 h sind die interessanten Ausschnitte ausgewählt. Der Nullpunkt des Instrumentes liegt in der

Mitte. Die Senkrechte in der Mitte des Papierstreifens ist die Nulllinie. Der Streifen zeigt, daß die Schiene immer positiv gegen das Rohr ist. Der Schienenstrang wirkt, vor allem in der Hauptverkehrszeit, als Anode gegenüber dem Rohrnetz. Streuströme aus der Schiene bewirken somit einen kathodischen Schutz.

Auch Anlagen des Elektrischen Korrosionsschutzes werden u. U. Streuströme verursachen, wenn das Schutzobjekt nicht eine metallisch verbundene Einheit ist oder wenn im Erdreich oder Wasser in der Strombahn zwischen Anoden und Schutzobjekt Metallkörper liegen, die nicht an das Schutzobjekt angeschlossen sind. Durch Änderung der Lage der Anoden oder durch Anschließen solcher gefährdeter Objekte an den Schutzkreis – gegebenenfalls über Widerstände, die den Strom begrenzen – ist Abhilfe möglich. Wird durch eine Trennung des isolierten (eigentlichen) Schutzobjektes von großflächigen nackten Installationen im Boden usw. der Schutzstrombedarf sehr erheblich vermindert (beispielsweise um eine bis zwei Zehnerpotenzen), so können etwaige Streuströme auf nicht mehr interessierende kleinste Werte verringert werden.

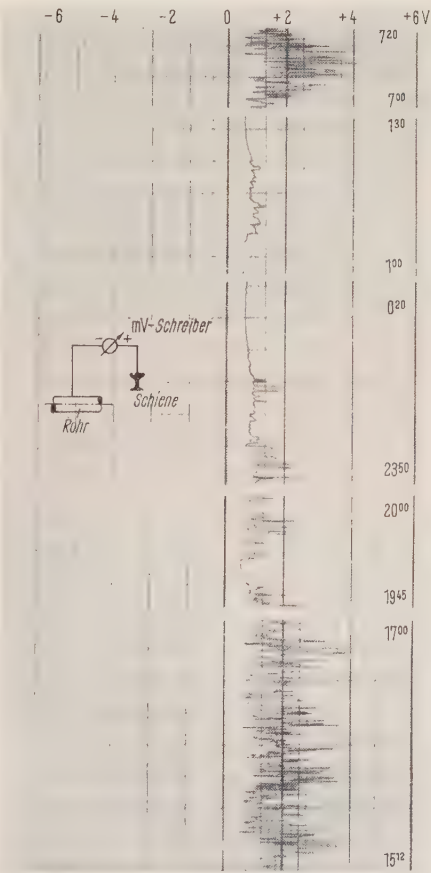


Bild 4 Der Streustrom einer Gleichstrombahn bewirkt kathodischen Schutz.  
Fahrschiene ist positiv gegen Rohr



## Stromversorgungsanlage und Anlagenzubehör, Graphitanoden

Die Stromversorgungsanlage ist entsprechend dem Schutzstrombedarf zu erstellen. Die Nennspannung beträgt für den Korrosionsschutz in Seewasser vorzugsweise 6 bis 12 V, für Süßwasser und Boden meistens 12 bis 24 V. Nur selten werden Spannungen unter 6 V oder über 24 V bis 48 V verwendet. Die Nennstromstärken der Gleichrichtereinheiten liegen normalerweise zwischen 0,5 und 400 A; die Betriebsstromstärken können bei größeren Anlagen bis zu einigen 1000 A betragen. Es werden hauptsächlich Selen- und Silizium-Gleichrichter eingesetzt. Die Spannungssteuerung, meistens in weitem Bereich vorgesehen, geschieht in Stufen oder kontinuierlich. Für den Elektrischen Korrosionsschutz von Schiffen ist eine leichte Stellmöglichkeit zur Anpassung an die

sehr unterschiedlichen Bedingungen der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers sehr erwünscht. Außer den üblichen Meßgeräten können auch Zähler und Relais zur Überwachung der Schutzströme oder Spannungen in Betracht kommen, ferner Einrichtungen zur Fernsteuerung und zum Überspannungsschutz oder Stellwiderstände.

Die Gleichrichter, vor allem die kleineren, und das Zubehör werden häufig als Bestandteil in die im Betrieb vorhandenen Schaltgerüste, Gußgruppen usw. eingebaut. Sie sind dann praktisch nicht als Ausrüstung zum Elektrischen Korrosionsschutz erkennbar.

Bild 5 zeigt einen Silizium-Gleichrichter in Sternschaltung für 2 bis 12 V, 200 A, für Spannungssteuerung mit Drehtransformator in Freiluftausführung mit zusätzlichen Fronttüren. Solche Gleichrichter werden bevorzugt zum Elektrischen Korrosionsschutz von Stahlwasserbauten in Seewasser eingesetzt.

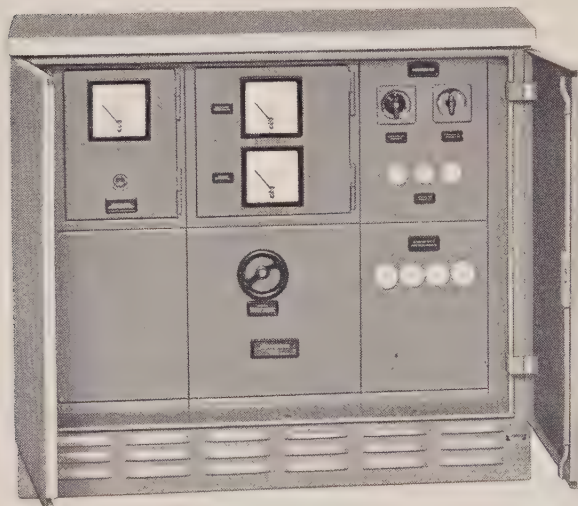


Bild 5 Silizium-Gleichrichter in Freiluftausführung 12 V, 200 A. Die Spannung wird mit einem Drehtransformator gesteuert



Bild 6 Block- und Stabanoden aus Graphit mit Anschlußkopf

Von erheblicher Bedeutung bei Anlagen für den Elektrischen Korrosionsschutz sind die Anoden, die den Schutzstrom ins Wasser oder in den Boden leiten. Sie bestehen meistens aus Graphit, der sich gut bewährt hat. Hauptsächlich Ausführungsformen sind Stab- oder Blockanoden, wie sie Bild 6 mit aufgeschraubtem kunstharzimpregniertem Anschlußkopf und mit PROTODUR\*-Kabel zeigt. Stabanoden, z. B. von 100 mm Durchmesser und 1500 mm Länge, werden häufig liegend oder stehend zweckmäßigerweise im Koksbed im Boden verlegt. Blockanoden, z. B. von 600 mm Durchmesser, ruhen beispielsweise auf dem Grund einer Wasserstraße, auf dem Meeresgrund usw. Werden Graphitanoden an Konstruktionsteilen aus Stahl oder dgl. befestigt, so ist eine kräftige und in Seewasser auch chlorbeständige Isolierung vorzusehen. Kurze Stromwege zwischen Anode und Schutzobjekt sind ganz allgemein zu vermeiden. Die Anoden sind so anzuordnen, daß sich der Schutzstrom möglichst gleichmäßig am Schutzobjekt verteilt. In schwierigen Fällen muß die günstigste Anordnung durch Probeeinsparungen ermittelt werden.

Für bestimmte Anoden und deren Lage kann bei gegebenem spezifischem elektrischem Widerstand des umgebenden Mediums ihr im Stromkreis maßgebender Widerstand berechnet werden. Für ausreichend große Abstände zwischen Anoden und Schutzobjekt wird die Berechnung ähnlich der von Erderwiderständen durchgeführt.

Die Anzahl der für eine Korrosionsschutzanlage benötigten Anoden bestimmter Größe hängt in der Regel von dem zu übertragenden Schutzstrom, vom umgebenden Wasser oder Boden und von einer erwarteten Lebensdauer ab. In besonderen Fällen, beispielsweise bei sehr hohen Bodenwiderständen und kleinen Schutzströmen,

\* Eingetragenes Warenzeichen

kann es zweckmäßig sein, zur Herabsetzung der vor der Anode abfallenden Spannung die sonst gegebene Anodenanzahl höher zu wählen.

### Potentialmessung am Schutzobjekt

Von Bedeutung sind die Messungen der elektrochemischen Potentiale der Metallobjekte gegenüber dem sie umgebenden Medium mit unpolarisierbaren Bezugsselektroden. Außer den für das Laboratorium gedachten feinen, aber auch sehr hochohmigen Kalomelzellen, die verhältnismäßig aufwendige Meßgeräte erfordern, werden bei Untersuchungen in der Praxis Zellen aus Kunststoff für Messungen am Boden und im Wasser verwendet (Bild 7). Sie stehen hauptsächlich als Kupfer/Kupfersulfat- bzw. Silber/Silberchlorid-Zellen zur Verfügung. Dazu gibt es hinreichend hochohmige tragbare Spannungsmesser, z. B. von 50 k $\Omega$ /V oder 1 M $\Omega$ /V.

Über Kriterien des kathodischen Schutzes besteht umfangreiches Schrifttum [1, 2, 3, 8], und es gibt viele Erörterungen darüber. Nach dem international häufig empfohlenen praktischen Rezept ist der Schutz von Stahl bei Vorliegen eines Schutzobjektpotentials von  $-850$  mV (gemessen mit der gesättigten Kupfer/Kupfersulfat-Zelle) als gut anzusehen. Ein höheres Schutzpotential wird oft erreicht und ist unter besonders aggressiven Verhältnissen auch notwendig. Umgekehrt kann man, besonders bei Seewasser, in Zusammenhang mit der Bildung einer Deckschicht auch mit einem geringeren Wert wirtschaftlich arbeiten.

Bei praktischen Potentialmessungen z. B. an in Erde verlegten Rohren kann der Meßwert u. U. durch einen Spannungsanteil des Schutzstromfeldes im Boden etwas erhöht sein. Die Erhöhung ist gering, wenn die Rohre einigermaßen isoliert sind. In anderen Fällen ist er abzuschätzen. Sehr kohlehaltiger Boden kann bei Trockenheit abweichende Werte ergeben.

Messungen über die vorgegebenen Verhältnisse und gegebenenfalls auch über die erreichbare Schutzwirkung sollen schon vor der Festlegung der Stromversorgung und der Anodenzahl und ihrer Lage durchgeführt werden. Dazu werden zunächst Meßanschlüsse am Schutzobjekt und an den benachbarten Installationen mit gut zugänglichen Klemmen benötigt. Solche Meßanschlüsse sind für Prüfungen nützlich, auch wenn nicht feststeht, ob ein kathodischer Schutz eingerichtet wird. Unter Asphalt oder Beton ist durch Einbau von Straßenkappen, die



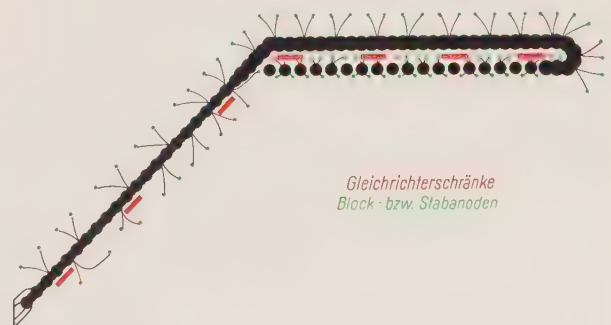
Bild 7 Kupfer/Kupfersulfat-Meßzellen in Kunststoffgehäuse für Potentialmessungen

Links Universalzelle mit wasserdichter Leitungseinführung  
Rechts für Messungen am Boden

nicht mit dem Schutzobjekt metalleitende Verbindung haben dürfen, das Erdreich zugänglich zu halten.

### Ausführungsbeispiele

Am Beispiel einer größeren stationären Anlage für Elektrischen Korrosionsschutz kann die praktische Anwendung veranschaulicht werden. Das Schutzobjekt ist der Molenhafen Acajutla (El Salvador), der von der Salzgitter-Industriebau GmbH als Generalunternehmer geplant und errichtet\* worden ist. Das Bauwerk ist auf sandgefüllten, mit Beton abgedeckten Zellen aus Stahlspundbohlen gegründet in einer Anordnung ähnlich Bild 8, aus dem auch die Lage der Anoden und Gleichrichter ersichtlich ist. Die freie Unterwasserfläche beträgt etwa 24000 m<sup>2</sup>, eine kleinere Fläche ist im Boden eingerammt. Silizium-Gleichrichter entsprechend Bild 5 sowie einige Gleichrichterschranke doppelter Leistung liefern den Schutzstrom von mehr als 2000 A. Taucher haben am Meeresgrund, abgesehen von der landseitigen Anlegemole, Graphitblockanoden ausgelegt. Zwischen den Zellen der Anlegemole hängen jeweils zwei Graphitstabanoden in einer Tragkonstruktion an Kunststoff-



Gleichrichterschranke  
Block- bzw. Stabanoden

Bild 8 Anordnung von Anoden und Gleichrichterschranken für den Elektrischen Korrosionsschutz eines Molenhafens

\* Für die Ausführung der Erd-, Beton- und Spundwandarbeiten war die Bauunternehmung Karl Stöhr KG, München, als Subunternehmer eingesetzt



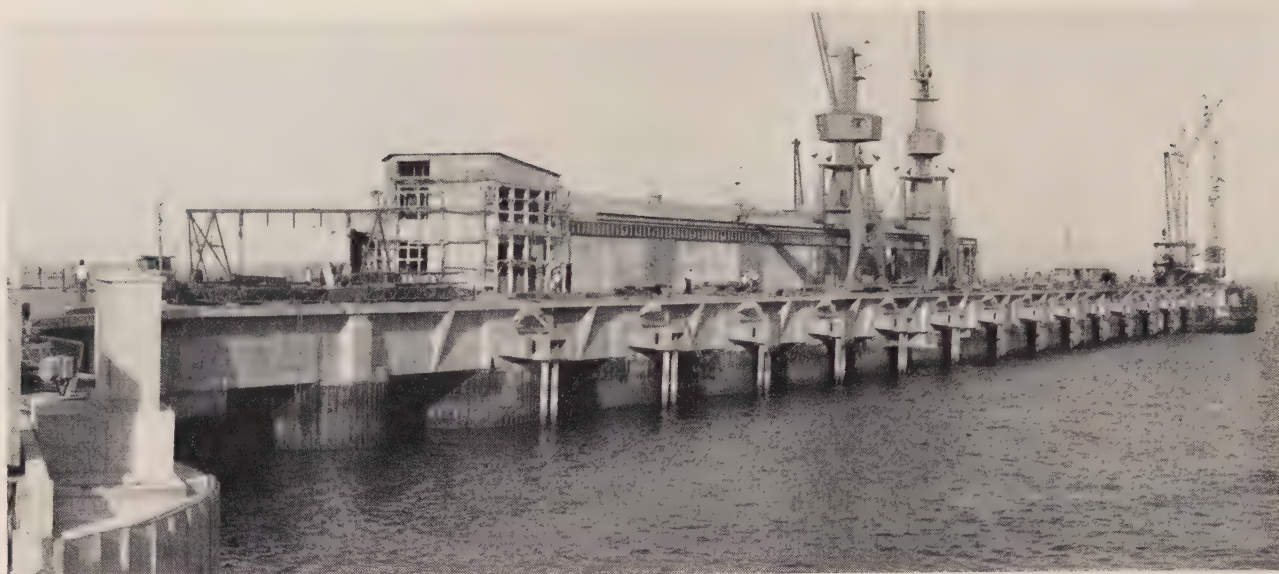


Bild 9 Anlegemole des Molenhafens entsprechend Bild 8. Gründung auf Rundzellen mit Stahlpundbohlen

seilen übereinander. Bild 9 zeigt einen Teil des Bauwerkes vor seiner Vollendung. Der Elektrische Korrosionsschutz ist seit fast zwei Jahren – ursprünglich für den zunächst fertiggestellten Bauteil – in Betrieb. Er hat die gestellten Erwartungen erfüllt.



Bild 10 Elektrischer Korrosionsschutz eines Seeschiffes. Blick auf die Heckanode in Kunststoffhalterung

Der elektrische Korrosionsschutz von Schiffen läßt sich gut beurteilen, da das Schiff von Zeit zu Zeit im Dock überprüft wird. In enger Zusammenarbeit mit Reedereien und Werften wurden 1959 folgende drei Trockenfrachter mit Elektrischem Korrosionsschutz ausgerüstet:

MS Indus und MS Maas, je 12000 tdw; Reederei: Friedrich A. Detjen, Hamburg; Bauwerft: Flensburger Schiffsbau-Gesellschaft, Flensburg und MS Käthe Jepsen, 6200 tdw; Reederei: M. Jepsen, Apenrade; Bauwerft: Werft Nobiskrug GmbH, Rendsburg

Eine weitere Anlage für ein Schiff der erstgenannten Reederei wird z. Z. bei Orenstein-Koppel und Lübecker Maschinenbau AG, Lübeck, ausgeführt.

Nach 2- bzw. 1½-jähriger Betriebszeit, vor allem in überseeischen Gewässern, wurde die Wirksamkeit der Anlagen von Sachverständigen als gut anerkannt. Bild 10 zeigt die bei einem der Schiffe mit einer Kunststoffhalterung an der Bordwand befestigte Heckanode aus Graphit. Weitere Graphitanoden sind an den Enden bzw. im Verlauf der Schlingerkiele angebaut. Den Schutzstrom liefert ein Silizium-Gleichrichter bis 200 A.

#### Schrifttum

- [1] Uhlig, H. H.: Corrosion Handbook. J. Wiley & Sons, Chapman & Hall. New York, London 1948
- [2] Klas, H. und Steinrath, H.: Die Korrosion des Eisens und ihre Verhütung. Verlag Stahl Eisen m.b.H., Düsseldorf 1956
- [3] Wiederholt, W. und Kaesche, H.: Korrosion 11, Kathodischer Korrosionsschutz. Verlag Chemie GmbH, Weinheim (Bergstraße) 1959
- [4] Morgan, J. H.: Cathodic Protection. Leonard Hill Ltd., London 1959
- [5] Applegate, L. M.: Cathodic Protection. McGraw-Hill, New York, Toronto, London 1960
- [6] Schiff und Hafen. Sonderheft Korrosionstagung 1960
- [7] VDE 0150/11.57; 0150 a/12.60; 0115 d/11.57
- [8] v. Baekmann, W. und Heim, G.: Kriterien für den kathodischen Schutz. Das Gas- und Wasserfach 101 (1960) 942 und 986

## Die Gasentnahme für industrielle Analysegeräte

VON ALFRED NAUMANN

Analysegeräte sind für viele Wirtschaftszweige unentbehrliche Meßgeräte zur Überwachung und optimalen Führung der Prozesse. Wirtschaftszweige, für die das zutrifft, sind z. B. Energieerzeugung, Chemie, Eisenhüttenwesen, Steine und Erden und Bergbau. Der Charakter dieser Grundstoffindustrien, die auf ununterbrochenen Dauerbetrieb eingestellt sind, fordert auch von den Analysegeräten eine kontinuierliche Messung. Meßgeräte, die dieser Aufgabe im rauen Betriebsklima gewachsen sind, sind für viele gasanalytische Meßgrößen vorhanden [1 bis 4].

So gut auch die Analysegeräte sein mögen, erst zusammen mit einer guten Entnahmetechnik ergibt sich die betriebsstüchtige Anlage. Eines ist so wichtig wie das andere.

Da für die verschiedenen Industrien keine einheitlichen Bedingungen vorliegen, können auch keine ins Einzelne gehenden Entnahme- und Reinigungsvorschriften gegeben werden. Es sollen deshalb bewährte Prinzipien anhand von Entnahme- und Aufbereitungsgeräten für ausgeführte Anlagen erläutert werden.

Eine brauchbare industrielle Entnahmetechnik muß vier Aufgaben lösen:

1. Ansaugen bei hoher Temperatur
2. Abscheiden von Staub
3. Trocknen des Meßgases
4. Vermeiden von Korrosion

Es müssen nicht immer sämtliche Forderungen gestellt werden, jedoch wird dies meistens der Fall sein und zwar besonders bei der Überwachung der Abgase von Industriefeuerungen, die in der Anzahl unter den technischen Analysenaufgaben überwiegen.

### Ansaugen bei hoher Temperatur

Hohe Temperaturen der zu entnehmenden Gase treten überwiegend bei Verbrennungsvorgängen auf. Es ist die Aufgabe der Analysegeräte, die Zusammensetzung der Abgase möglichst frühzeitig anzuzeigen. Dafür ist es notwendig, die Entnahme dorthin zu setzen, wo die Verbrennungsreaktion soeben beendet ist. Das bringt auch den Vorteil, daß die Zusammensetzung der Abgase noch nicht durch Falschlufte verändert ist.

Es ist naheliegend, die hohe Temperatur der Abgase durch wassergekühlte Entnahmerohre zu beherr-

schen. Wassergekühlte Entnahmerohre haben jedoch grundsätzliche Nachteile, die trotz mancher Verbesserungen nicht befriedigend überwunden werden konnten.

### Nachteile wassergekühlter Entnahmen

Ein Entnahmerohr mit einem Kaltwasser-Kühlmantel muß stets mit der Ansaugöffnung nach unten im Feuer-raum stehen, damit die Luftblasen, die durch die Erwärmung des Kühlwassers frei werden, nach oben weggeführt werden können, entsprechend ihrer natürlichen Steigrichtung (Bild 1). Anderenfalls sammelt sich die Luft an der Feuerseite des Kühlmantels und die Entnahme brennt wegen mangelnder Kühlung auf. Das Kühlwasser spritzt unkontrolliert in den heißen Ofen, was kostspielige Stillstände oder Zerstörungen hervorrufen kann.

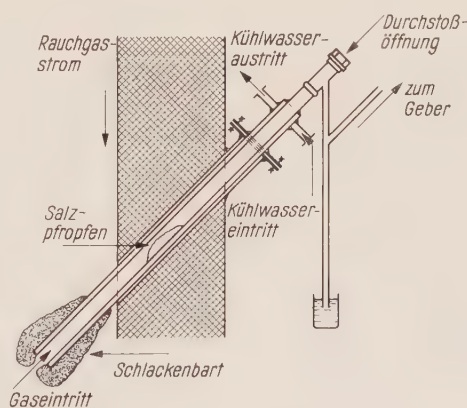


Bild 1 Schema einer wassergekühlten Entnahme (zur Erläuterung der Nachteile)

Leider bringt aber die nach unten geneigte wassergekühlte Entnahme den Nachteil mit sich, daß das Kondenswasser des Gases sich bereits im fallenden Teil des Entnahmerohrs abscheidet, in den heißeren Teil zurückläuft, hier wieder verdampft, sich wieder abscheidet und auf diese Weise allmählich einen Salzpfropfen an der Stelle der Taupunktgrenze aufbaut, der das Entnahmerohr verschließt, denn Rauchgas führt beträchtliche Mengen gelöster Salze mit sich.

Man hat diesen Nachteil dadurch zu bekämpfen versucht, daß man entweder gewärmtes Wasser zur Kühlung be-



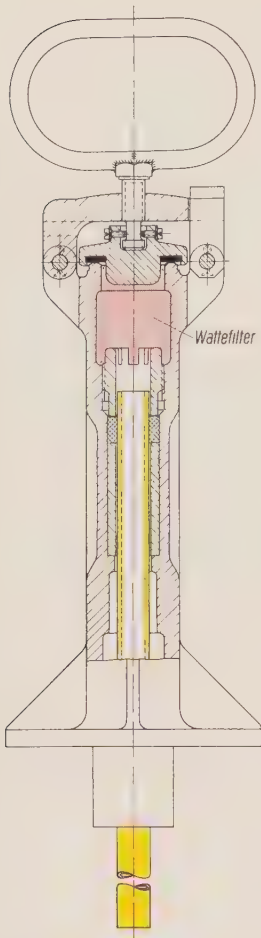


Bild 2 Wasserfreie Hochtemperatur-Entnahme (bis 1800°C) für senkrechte Montage

ihr reicht ein dichtes keramisches Entnahmerohr aus Tonerde senkrecht (oder nahezu senkrecht) bis direkt in den Feuerraum. Solche feuerfesten Rohre sind für eine Temperaturbeanspruchung bis zu 1800°C geeignet, wenn sie mechanisch möglichst unbelastet bleiben. Das ist bei diesen Temperaturen nur in senkrechter Lage der Fall. Bei waagrechtem Einbau ohne Kühlung genügt bei hohen Temperaturen bereits das eigene Gewicht des Rohres, um es allmählich abknicken zu lassen.

Das senkrechte Einbringen des Rohres hat weiterhin den Vorzug, daß größere Staub- und Schlacketeilchen, die durch die Turbulenz der Abgase in die Rohröffnung gelangen, sich nicht im Rohr ablagern wie bei einer waagerechten Entnahme, sondern nach unten herausfallen.

Außerdem laufen glutflüssige Schlacketeilchen, die an das Rohr geschleudert werden, nach unten wieder ab, da das glühende keramische Rohr an der Mündung die gleiche Temperatur wie der Feuerraum hat.

Bild 3 zeigt das Ende zweier Rohre, die acht Monate im oberen Gewölbe eines Siemens-Martin-Ofens bei 1750°C

nutzte oder das Innere des Kühlmantels mit einer wärmedämmenden Ausfütterung aus Keramik oder Asbest versah, um den Taupunkt aus dem Innern des Entnahmerohres nach außen zu verlegen. Aber dies ist aufwendig und nicht zuverlässig.

Enthält das Abgas flüssige Schlacketeilchen, wie z. B. bei Kohlenstaubeuerungen, Zementöfen und SM-Öfen, so haben wassergekühlte Entnahmen den Nachteil, daß sie an der Entnahmemündung rasch einen Schlackenbart aufbauen, der die Entnahme verschließt (s. Bild 1).

Wasserfreie Entnahmen für hohe Temperaturen

Eine Gasentnahme, die ihre Aufgabe ohne Wasser erfüllt, wird gegenüber einer wassergekühlten betriebstüchtiger sein. Bild 2 zeigt im Schnitt eine wasserfreie Gasentnahme, die den höchsten, in hüttenmännischen Öfen vorhandenen Temperaturen (bis etwa 1800°C) genügt. Bei

in Betrieb waren und während dieser Zeit ununterbrochen offenblieben.

Konstruktiv ist die Entnahme (Bild 4) so ausgeführt, daß ein glattes feuerfestes Rohr ohne Bund vom Meter benutzt werden kann. Dies ist aus Preisgründen und wegen eines einfachen Ersatzes für den Betrieb wichtig. Das Rohr wird mit Hilfe von Glasband stopfbuchsenartig festgehalten (s. Bild 2). Unmittelbar über der oberen Öffnung des keramischen Rohres, das mit einer Kronenmutter aus Stahl von V4A-Qualität endet, befindet sich ein festgestopfter Glaswattefilz, der das Rauchgas von den noch mitschwebenden Staubteilchen filtert. In die Entnahme können keramische Rohre mit zwei verschiedenen Weiten eingesetzt werden: 8 und 12 mm lichte Weite.

Bei 1 l/min Durchsatz und 1,5 m Länge des keramischen Rohres von 12 mm l. W. hat die Entnahme die in Tafel 1 aufgeführten Tot- und Übergangszeiten. Diese Entnahme hat sich bewährt bei Tiefofen, Siemens-Martin-Öfen, Dampferzeugern und an Stoßöfen [5]. Für die letztgenannten werden häufig wegen der starken mechanischen Beanspruchungen statt der keramischen Entnahmerohre Kanthal-Sintermetallrohre benutzt. Sie sind zwar gegen Erschütterungen bedeutend dauerhafter, doch ist ihre Lebensdauer bei 1300°C wegen der Oxydation des



Bild 3 Entnahmerohre der beiden wasserfreien Hochtemperatur-Entnahmen im Gewölbe eines Siemens-Martin-Ofens (1750°C)



Bild 4 Wasserfreie Hochtemperatur-Entnahme (bis 1800°C) für senkrechten Einbau

Materials auf 3 bis 6 Monate beschränkt. Der feuerfeste amerikanische Stahl »Nimonic« scheint neue Möglichkeiten zu eröffnen.

Abscheiden von Staub

Die zu messenden Industriegase führen meist erhebliche Staubmengen mit sich, die vor Eintritt in die Meßgeräte unbedingt abzuscheiden sind. Sowohl Analysegeräte nach Hitzdraht- als auch nach optischen Methoden verändern selbst bei geringer Verstaubung ihren Nullpunkt und ihre Empfindlichkeit.

Einen Anhalt für den Staubgehalt einiger häufig gemessener Industrieabgase gibt die Tafel 2 [6].

Für die Abscheidung des Staubes gilt der Grundsatz:

Zuerst den Staub, dann das Wasser

Andernfalls bilden Feuchte und Staub einen Schlamm, der Filter und Leitungen rasch verstopft.

Dieser Grundsatz läßt sich bei Verbrennungsgasen nur mit geheizten Staubfiltern verwirklichen, denn die Taupunkte der Abgase liegen zwischen 100 und 190 °C, je nach dem Schwefelgehalt des Brennstoffes. Die einfachste Maßnahme ist, Entnahmerohr und Filter räumlich möglichst dicht zu vereinigen, damit die Eigenwärme des Rauchgases ausreicht, das Filter vor der Unterschreitung des Taupunktes zu durchsetzen. Die Art der Einbringung der Entnahme sorgt zusätzlich für die Erwärmung des Filtertopfes. Bild 5 zeigt eine solche Entnahme mit rauchgasbeheiztem Glaswollefilter im Schnitt. Sie ist bei Temperaturen zwischen 250 und 900 °C verwendbar. Das eigentliche Entnahmerohr besteht aus zunderfestem Stahlrohr, z. B. Sicromal 12. Zur Reinigung läßt es sich nach Lüften des Einschrauben-Scharnierdeckels glatt durchstoßen.

Der Filtertopf ist durch einen herausziehbaren Drahtrost der Länge nach in zwei Hälften geteilt. Die eine Hälfte wird mit langfädiger, gekräuselter Glaswolle von 5 bis 10 µm Fadenstärke fest gestopft (s. Bild 5). Das Gas durchsetzt also frontal eine verhältnismäßig große Filterfläche von 180 cm², wodurch ein geringer Druckabfall gegeben ist.

Das Wattenfilter ist seiner Natur nach ein Prallfilter. Eine andere Filterart sind die Siebfilter. Diese sind Oberflächenfilter, jene Volumenfilter. Die Volumenfilter sind durch große Filterkapazität gekennzeichnet. Ein solches Wollfilter der obigen Abmessung bleibt, wie die Erfahrung zeigt, bei einer Belastung mit 3 l/min Gichtgas von 200 g/m³ Staub 4 bis 6 Wochen durchlässig. Nach Erschöpfung wird der Filz mit Hilfe des Drahtrostes, der am unteren Ende Klauen hat, herausgezogen und weggeworfen. Unter Wiederverwendung des Rostes wird das Filter erneut mit Glaswolle gestopft.

	1 l/min
Totzeit	18 s
50 %-Zeit	36 s
90 %-Zeit	55 s

Tafel 1 Ausspülzeiten der wasserfreien Hochtemperatur-Entnahme. Durchsatz 1 l/min; Entnahmerohr 1,5 m lang, 12 mm l.W.

Art des Meßgases	Staubgehalt in g/Nm³
Hochofengichtgas an der Gicht	10 bis 200
Braunkohlengeneratorgas	5 bis 50
Zementdrehofen (Trockenverfahren)	8 bis 20
Zementdrehofen (Naßverfahren)	5 bis 10
Siemens-Martin-Ofen	1 bis 15
Steinkohlenstaubfeuerungen	5 bis 15

Tafel 2 Staubgehalt von Industrieabgasen

	1 l/min
Totzeit	33 s
50 %-Zeit	62 s
90 %-Zeit	106 s
Druckabfall bei 1 l/min 20 mm WS	

Tafel 3 Ausspülzeiten der Entnahme mit rauchgasbeheiztem Glaswollefilter. Entnahmerohr 1 m lang, 22 mm l.W.

Die Ausspülzeiten der Entnahme und ihr Druckverlust sind aus Tafel 3 zu entnehmen.

Reicht die Eigenwärme des Meßgases nicht aus, was etwa unter 250 °C eintritt, so muß der Filtertopf zusätzlich beheizt werden. Hier bietet sich in vielen Fällen die Entnahme mit dampfbeheiztem Glaswollefilter an (Bild 6). Sie entspricht, was die gasführenden Wege betrifft, dem Aufbau nach Bild 5. Die ganze Entnahme einschließlich Filtertopf ist jedoch mit einem allseitig geschlossenen Mantelrohr umgeben, das zu etwa einem Zehntel seines Volumens mit Wasser gefüllt ist.

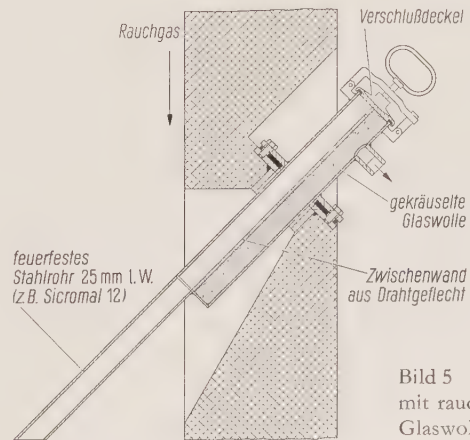


Bild 5 Entnahme mit rauchgasbeheiztem Glaswollefilter



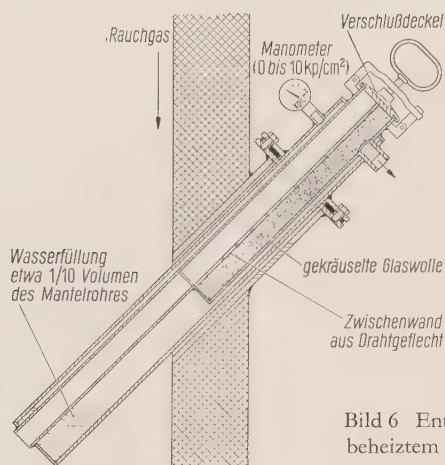


Bild 6 Entnahme mit dampf-beheiztem Glaswollefilter

Während des Betriebes tritt im unteren Ende eine Verdampfung des Wassers, also Aufnahme von Wärme aus dem Rauchgas, und im oberen Ende Kondensation des Dampfes, also Wärmeabgabe ein. Im Gleichgewichtszustand stellen sich über das ganze Mantelrohr ein konstanter Druck und eine konstante Temperatur ein. In Tafel 4 sind die korrespondierenden Temperaturen und Drücke aufgeführt. Bild 7 zeigt, wie eine solche Entnahme am Ende eines nach dem Naßverfahren arbeitenden Zementofens eingebaut wird. Sie ist in diesem Fall

3 m lang. Die Abgastemperatur beträgt  $150^{\circ}\text{C}$ , der Druck im Mantelrohr  $5\text{ kp/cm}^2$ . Bei etwa  $90\text{ g/m}^3$  Feinstaub reicht eine Filterfüllung etwa sechs Wochen. Die Mündung des Entnahmerohrs wird in festen Zeitabständen mit einem Preßluftstoß freigeblasen. Bild 8 zeigt eine derartige Entnahme in Zusammenarbeit mit einem magnetischen Sauerstoffmesser OXYMAT\*.

Die Entnahme mit Dampfmantel hat den Vorteil, daß man sehr lange Entnahmerohre, bis zu 5 m, gleichmäßig warm halten kann. Man kann auf diese Weise das Meßgas aus dem Kern großer Zementöfen entnehmen, ohne daß in dem langen Entnahmerohr die Gefahr einer Unterschreitung des Taupunktes besteht.

Wenn das eigentliche Entnahmerohr dagegen nur kurz ist, wie z. B. bei der Entnahme aus Gichtgasleitungen, dann genügt die elektrische Beheizung des Filtertopfes allein. Eine solche Entnahme mit elektrisch beheiztem Glaswollefilter zeigt Bild 9. Zur Gasfiltration dient ebenfalls ein fest gestopfter Glaswollefilz. Bild 10 zeigt eine am Hochofen zur Gichtgasmessung eingebaute Entnahme. Bei einer Belastung mit  $3\text{ l/min}$  Gichtgas von  $200\text{ g/m}^3$  Staub bleibt sie 4 bis 6 Wochen durchlässig [7] (Tafel 5).

\* Eingetragenes Warenzeichen



Bild 7 Entnahme mit dampf-beheiztem Glaswollefilter bei der Montage am Zement-Drehofen

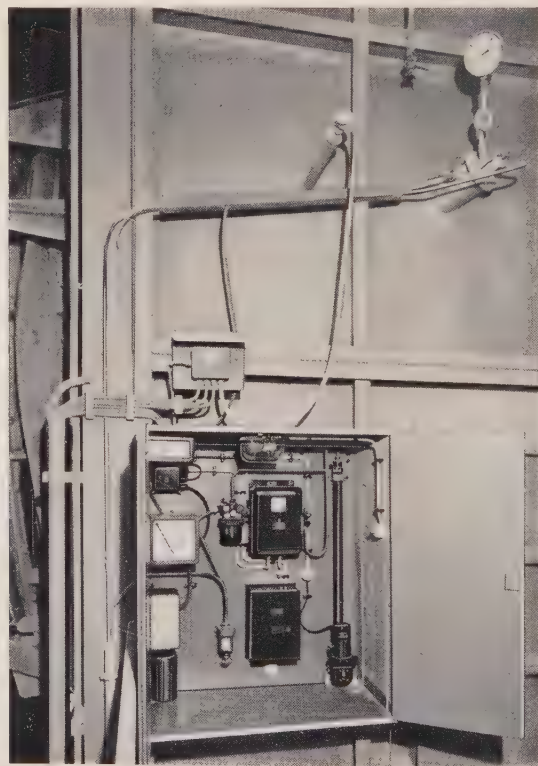


Bild 8 Entnahme mit dampf-beheiztem Glaswollefilter in Zusammenarbeit mit magnetischem  $\text{O}_2$ -Messger OXYMAT am Zement-Drehofen

Temperatur des Dampfmantels °C	Druck im Mantelrohr kp/cm²
100	1
150	5
200	16
250	40
300	87

Tafel 4 Temperatur und Druck im Mantelrohr einer Entnahme mit dampf-beheiztem Glaswollefilter

	1l/min
Totzeit	38 s
50%-Zeit	89 s
90%-Zeit	121 s
Druckabfall bei 1 l/min	15 mm WS

Tafel 5 Ausspülzeiten der Entnahme mit elektrisch beheiztem Glaswollefilter. Entnahmerohr 0,5 m lang, 30 mm I. W.

	1l/min
Totzeit	1,2 s
50%-Zeit	2,0 s
90%-Zeit	3,0 s

Tafel 6 Ausspülzeiten des Membranfilters

Zum Entstauben von Meßgasen, die Raumtemperatur haben, dient das Kopffilter nach Bild 11. Es bildet den Anfang der Ansaugleitung und ist ein keramisches Feinfilter aus Siliziumkarbid mit einer mittleren Porengröße von 60 µm. Es hat bei 1 l/min Durchsatz 0,5 mm WS Druckabfall.

Für Aufgaben der Feinstaubabscheidung, insbesondere für optische Analysegeräte, ist ein Membranfilter nach den Bildern 12 und 13 geeignet. Zwei Filterscheiben mit einer Porengröße zwischen 0,5 und 1 µm von je 50 cm² Fläche sind parallelgeschaltet. Dadurch ergibt sich nur eine kleine Ausspülzeit (Tafel 6).

Das Filter ist seiner Natur nach ein Siebfilter, d. h. ein Oberflächenfilter. Verglichen mit einem Wollefilter ist seine Kapazität, oder die Menge Staub, mit der es beladen werden kann, wesentlich geringer. Man wird es deshalb überwiegend als nachgeschaltetes Feinstfilter für Restanteile von Staub benutzen. In vielen Fällen kann der Staub von der Oberfläche des Filters abgeburstet werden, wodurch die Membran mehrere Male verwendbar ist. Die Verwendung dieses Filters ist auch angezeigt, wenn Ansaugwege von extrem kleiner Totzeit gebraucht werden.

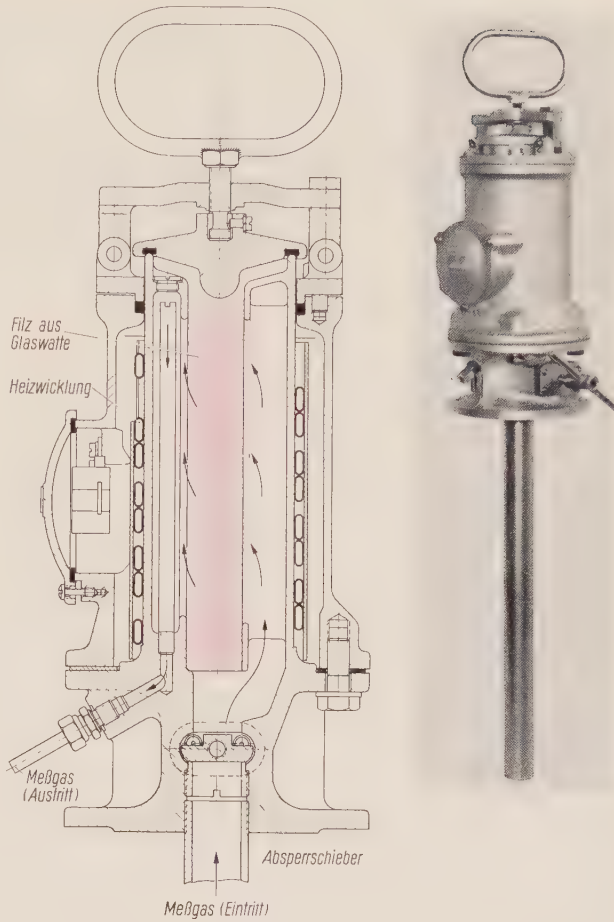


Bild 9 Schnitt und Ansicht einer Entnahme mit elektrisch beheiztem Glaswollefilter



Bild 10 Entnahme mit elektrisch beheiztem Glaswollefilter am Hochofen (Gichtgasmessung)



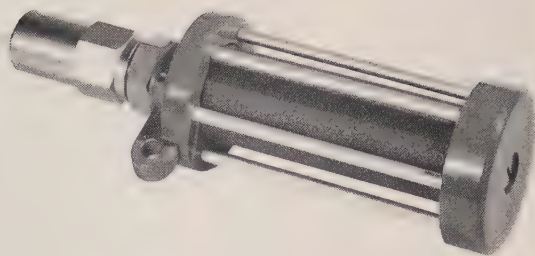


Bild 11 Kopffilter mit Keramikzylinder

### Trocknen des Meßgases

Kondensierende Feuchte des Meßgases ist für industrielle Analysegeräte besonders schädlich. Wasser in den Meßkammern erzeugt Nebenschlüsse und Korrosionen. Seiner vorherigen Abscheidung ist deshalb größte Sorgfalt zu widmen. Es gibt verschiedene bewährte Maßnahmen. Die wichtigste ist

a) die richtige Verlegung der Entnahmeleitung  
Dafür gilt folgender

Grundsatz:

Das Analysegerät muß immer wärmer sein als die kälteste Stelle der Entnahmeleitung. An dieser kältesten Stelle muß sich unbedingt ein Kon-

denstopf befinden. Alle Gasleitungen müssen sowohl der Temperatur wie dem Verlauf nach fallend zu dieser Stelle hin verlegt sein.

Ist diese stetig fallende Verlegung aus räumlichen Gründen nicht in einem Schritt durchführbar, sondern z. B. nur in zwei Schritten, so muß auch ein zweiter Kondensstopf vorgesehen werden.

### b) Zwangskühlung

Ist die geforderte kälteste Stelle nicht von Natur aus vorhanden, so muß sie künstlich geschaffen werden, z. B. mit einem Wasserkühler oder mit einem elektrischen Kühlaggregat.

Da dann die Sicherheit der Meßgeräte ganz von der Zuverlässigkeit des Kühlers abhängt, ist der Wasserkühler mit einem Strömungswächter zu versehen, der die Pumpe des Analysegerätes abschaltet, wenn das Wasser wegbleibt.

Bei elektrischen Kühlern müssen ein Temperaturwächter gegen Ausbleiben der Kühlerwirkung (Stromausfall, Erschöpfung der Absorber) und ein Thermostat gegen Einfrieren abgeschiedenen Wassers vorhanden sein. Der Temperaturwächter hat auch dafür zu sorgen, daß nach dem Einschalten des Kühlers das Analysegerät erst beströmt werden kann, wenn das Kühlaggregat auf Unter-temperatur gekommen ist.

Beide Möglichkeiten der Zwangskühlung sind einesteiis wegen des Wasserverbrauchs, anderen- teils wegen der Anschaffungskosten aufwendig und obendrein nicht völlig zuverlässig. Beides vermeidet

### c) der selbsttätige Trockenvorsatz

Er trocknet das Meßgas mit Hilfe der atmosphärischen Luft, die in Deutschland selbst in feuchtwarmen Gegenden, wie der oberrheinischen Tiefebene (Karlsruhe) im Mittel nur etwa 50 bis 60% der Sättigungsfeuchte enthält. Es ist einleuchtend, daß für diesen Trockenvorgang Meßgas und Luft nicht miteinander gemischt werden dürfen. Hieraus erklärt sich der Aufbau des Trockenvorsatzes nach Bild 14. Eine Wanne ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die aufgrund ihrer besonderen Beschaffenheit den Feuchteaus- tausch besorgt. Die Wanne ist durch einen Steg, der nicht bis auf den Boden reicht, in zwei Hälften geteilt. Dadurch werden die Gasräume getrennt gehalten, während die beiden Flüssigkeitshälften kommunizieren und durch den Rühreffekt der Gasblasen beständig miteinander vermischt werden. Die Flüssigkeit entnimmt dem Meßgas Wasser, transportiert es auf die Luftseite und lädt es der Luft auf. Trockenmittel ist also nicht die

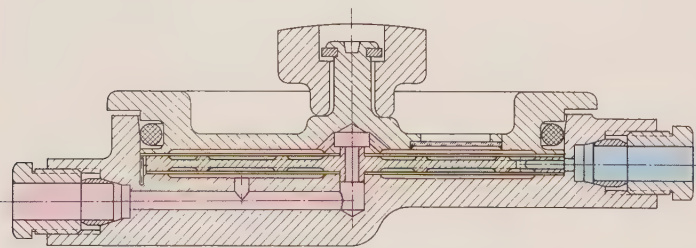


Bild 12 Doppelmembranfilter mit kleinem Volumen

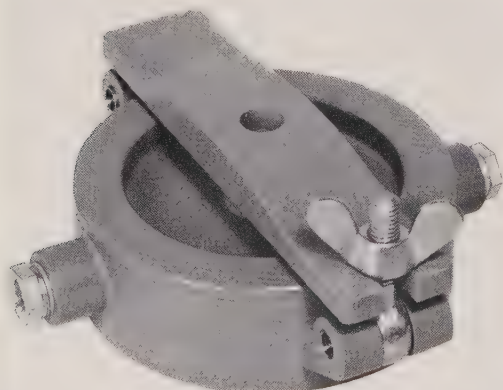


Bild 13  
Doppel-  
membranfilter

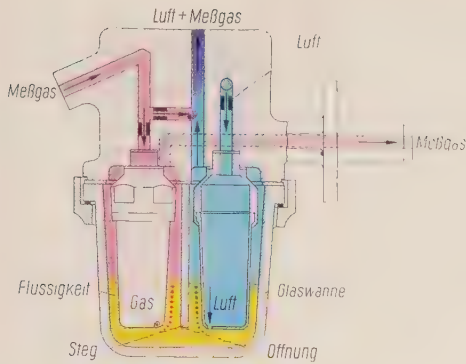
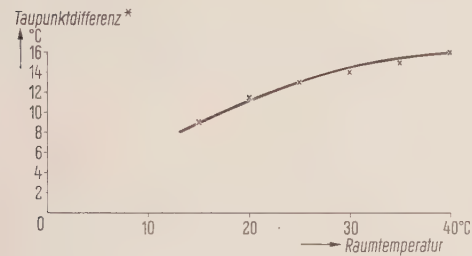


Bild 14 Gaslauf des selbsttätigen Trockenvorsatzes



\* bei Ansaugen von Luft mit 8g H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> (mittlerer Wassergehalt der Luft in Karlsruhe) und 6°C Übertemperatur der Kammer. Beströmung: 0,5 l/min Gas bei Raumtemperatur gesättigt 0,5 l/min Luft

Bild 15 Taupunktdifferenzen bei Verwendung des selbsttätigen Trockenvorsatzes

Flüssigkeit, sondern die Luft. Die Flüssigkeit ist nur das Medium, das den Feuchtetransport besorgt [1]. Sie erschöpft sich in ihrer Wirkung nicht, auch verdunstet sie nicht merkbar, ihr Siedepunkt liegt bei 335 °C. Sie ist beständig gegen technisch vorkommende Gase; Schwefelsäure wird von ihr bis zu einem gewissen Betrag gebunden. Zu große Schwefelsäurebelastung führt zu einer Koagulierung der Flüssigkeit und zeigt hierdurch an, daß das Meßgas eine besondere Schwefelsäurereinigung erfahren muß (s. unten).

Es ist nicht die Aufgabe des Trockenvorsatzes, das im Meßgas gelöste Wasser völlig zu beseitigen, sondern dafür zu sorgen, daß in den Meßkammern des Gebers Wasser nicht kondensiert, d. h., daß die Taupunkttemperatur in der Kammer nicht unterschritten wird. Dies kann bei Verwendung des Trockenvorsatzes grundsätzlich nicht mehr eintreten, wie Bild 15 zeigt. Die Kurve sagt aus, daß selbst im ungünstigsten Fall der Kammerblock des Gebers um 8 °C kälter werden müßte als der Trockenvorsatz, wenn Kondensation in der Kammer eintreten sollte. Das ist aber nicht möglich, weil beide Teile metallisch aneinandergeflanscht sind und somit ein nennenswertes Temperaturgefälle nicht bestehen kann.

Selbst bei Wetterlagen, in denen die Außenluft mit Feuchte gesättigt ist (Nebel) wirkt die Trocknung nach

diesem Prinzip, da die Innenluft der Kesselhäuser und Verbrennungsanlagen aller Art, für die der Trockenvorsatz überwiegend eingesetzt wird, erwärmt ist und somit ihr Sättigungsgrad bedeutend herabgesetzt ist.

Um ein Schäumen der Flüssigkeit zu verhindern, ist der Durchsatz durch den Trockenvorsatz auf 0,5 l/min begrenzt. Die Anzeigeverzögerung des Gebers, der normalerweise mit 1 l/min beströmt wird, erhöht sich also. Die Ausspülzeiten der Entnahmeleitung jedoch, die das Zeitverhalten der Anlage bestimmen, bleiben ungeändert, weil ein Nebenschluß (s. Bild 14) nochmals 0,5 l/min Meßgas direkt in die Absaugeleitung befördert, so daß die Entnahmeleitung wieder wie vorher mit 1 l/min belastet ist. Die zusätzlichen Zeiten, die durch den Trockenvorsatz entstehen, betragen im Fall des magnetischen O<sub>2</sub>-Messers zwischen 8 und 18 s (s. Tafel 7).

Bild 8 zeigt einen Sauerstoffmesser mit Trockenvorsatz im Einsatz an einem Zementofen.

Der Trockenvorsatz wird auch für andere Geber verwendet. Er hat folgende Vorteile:

- Kein Verbrauch von Chemikalien
- Keine Hilfsenergie (Strom, Wasser)
- Keine bewegten Teile
- Trocknung wirkt sofort mit der Beströmung
- Keine Gefährdung des Analysegerätes bei Ausfallen der Versorgungsenergie
- Geringer technischer Aufwand, keine Wartung

d) Chemische Trockenmittel

Für Sonderaufgaben ist eine quantitative Trocknung der Meßgase nötig, z. B. für Wärmeleitmesser mit abgeschlossener Vergleichskammer, oder für Gase, die im feuchten

	ohne Vorsatz	mit Vorsatz	zusätzliche Zeit
Totzeit	2,5 s	10 s	7,5 s
50 %-Zeit	5 s	13 s	8 s
90 %-Zeit	20 s	32 s	12 s

Tafel 7 Ausspülzeiten eines magnetischen Sauerstoffmessers mit und ohne selbsttätigen Trockenvorsatz

Trockenmittel	brauchbar für:	unbrauchbar für:
Calciumchlorid CaCl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>
Silicagel	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Ar, He	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , Kohlenwasserstoffe
Gebrannter Kalk CaO	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>
Konzentrierte Schwefelsäure H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> , ungesättigte Kohlenwasserstoffe

Tafel 8 Trockenmittel für die technische Gasanalyse



Zustand korrosiv werden, z. B.  $\text{SO}_2$ . Es gibt kein universell verwendbares Trockenmittel. Einige Fälle der Eignung und der Nichteignung gebräuchlicher Trockenmittel sind in Tafel 8 zusammengestellt.

### Vermeiden von Korrosion

Die meisten zu analysierenden Gase, besonders Verbrennungsabgase aller Art, wirken korrosiv. Die Hauptursache dafür ist der Gehalt der Brennstoffe an brennbarem Schwefel, meist in organischer Bindung. Heizöle können bis zu 5 Gew.-%, Stein- und Braunkohlen bis zu 3 Gew.-% brennbaren Schwefel enthalten. Aus diesem entsteht bei Luftmangel Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und bei Luftüberschuß Schwefeldioxyd ( $\text{SO}_2$ ) und Schwefeltrioxyd ( $\text{SO}_3$ ). Die beiden letztgenannten gehen bei Gegenwart von Wasserdampf (den jedes Rauchgas enthält) in schweflige Säure und in Schwefelsäure über.

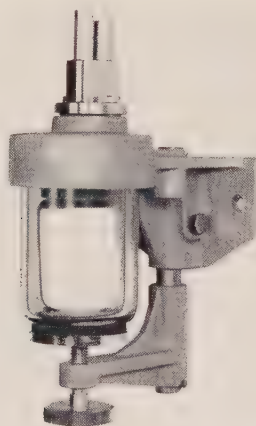


Bild 16 Schwefelsäurefilter



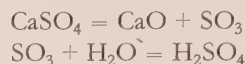
Bild 17 Technisches Schwefelwasserstofffilter

	1 l/min	
	Kurzes Filter 50 mm lang	Langes Filter 130 mm lang
Totzeit	5 s	12 s
50 %-Zeit	7,5 s	17 s
90 %-Zeit	9,5 s	19,5 s
Druckabfall	60 mm WS	60 bis 125 mm WS

Tafel 9 Ausspülzeiten des Wattefilters

Schwefelsäure ist stark korrosiv und die Hauptursache der meisten ersten Korrosionsfälle.

Schwefelsäure entsteht außerdem bei der Verfeuerung mineralstoffreicher Kohlen (z. B. Peißenberger Pechkohle) durch Zersetzung von Sulfaten, z. B. von Gips:



Die Schwefelsäure hat die Eigenschaft, schon bei verhältnismäßig hoher Temperatur zu Tröpfchen zu kondensieren. Der »Schwefelsäuretaupunkt« des Rauchgases kann, je höher der Schwefelgehalt des Brennstoffes und je höher der Luftüberschuß der Verbrennung sind, bis zu 190 °C hoch liegen.

Auf dieser Eigenschaft der Schwefelsäure beruht die technisch wirkungsvollste Methode, sie zu bekämpfen: Man filtert die Tröpfchen durch einen dichten, sehr feinfädigen Wattefilter aus Glaswolle oder durch ein säurefestes Membranfilter heraus. Keine Abgasanalyse kann bei den heutigen Brennstoffen ohne dieses Schwefelsäurefilter auskommen. Bild 16 zeigt ein solches Filter, fest gestopft mit langfädiger Glaswolle von höchstens 6 bis 10  $\mu\text{m}$  Fadenstärke (s. auch Tafel 9).

Schwefelsäurekorrosionen sind kenntlich durch bläulich-weiße, feuchte Schichten auf Messing oder tiefblaue Kristalle auf Kupfer. Ansaugleitungen aus Kupfer sind bei den heutigen Brennstoffen nicht mehr brauchbar. Kunststoffleitungen aus Polyvinylchlorid oder Polyäthylen sind unbedingt empfehlenswert. Bei dieser Verlegungsart ist es unerlässlich, die Übergangsstellen vom Schlauch auf die Metallstutzen der Geräte mit radial wirkenden Schellen gegen Undichtwerden zu sichern.

Korrosive Wirkungen durch  $\text{SO}_2$  oder durch schweflige Säure sind durch scharfe Trocknung des Meßgases vermeidbar. Trockenes  $\text{SO}_2$  ist nicht mehr korrosiv. Die Trocknung muß mit konzentrierter Schwefelsäure vorgenommen werden.

Zum Abscheiden der beim Durchperlen entstehenden Schwefelsäuretröpfchen ist unbedingt ein Wattefilter nachzuschalten.

Gegen Ammoniak-Beimischungen ( $\text{NH}_3$ ), die aus Messing bestehende Bauteile der Geräte selbst im trockenen

Zustand angreifen, hilft ebenfalls die erwähnte Schwefelsäurewaschflasche mit Wattefilter.

Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) wirkt selbst in kleinen Beimengungen (unter 0,5 Vol.-%) und selbst im trockenen Zustand stark korrosiv auf silberne Bauteile.

$H_2S$  verursacht ferner an nickelhaltigen Baustoffen, z. B. Gasleitungen aus Edelstahl, typischen Lochfraß, der selbst Rohre von 1,5 mm Wanddicke mit feinen Löchern von Stecknadelstärke durchbohrt.

Abhilfe gegen Schwefelwasserstoff schafft ein Vorschaltfilter mit gekörntem hochporösem Eisenhydroxyd, wie es unter dem Namen »Gasreinigungsmasse« zur Leuchtgasreinigung üblich ist.

Bild 17 zeigt ein technisches Schwefelwasserstofffilter. Es absorbiert  $H_2S$  quantitativ, die Masse färbt sich dabei in

vorrückender Zone schwarz und zeigt dadurch die Erschöpfung des Filters an.

Gegen andere korrosive Beimengungen, die seltener vorkommen, wie Chlor, Salzsäure, Flußsäure, Cyan und Blausäure, müssen von Fall zu Fall besondere Maßnahmen getroffen werden.

#### Schrifttum

- [1] Naumann, A. und Schneider, E.: Verbesserte Gasanalysegeräte nach dem Wärmeleitverfahren. Siemens-Zeitschrift **27** (1953) 8 bis 18
- [2] Naumann, A.: Ein neuer magnetischer Sauerstoffmesser mit nur geringer Abhängigkeit von Nebeneinflüssen. Dechema-Monographien **25** (1955) 169 bis 183
- [3] Naumann, A. und Klimitz, H.: Ein neuer elektrischer Grubengasschreiber. Glückauf **94** (1958) 1355 bis 1361
- [4] Naumann, A. und Schultz, G.: Das INFRAMETER, ein neues Betriebsgerät zur Infrarot-Gasanalyse ohne spektrale Zerlegung. Chemie-Ingenieur-Technik **32** (1960) 669 bis 674
- [5] Naumann, A. und Oster, H.: Abgasanalyse am Tiefofen und am Siemens-Martin-Ofen. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 341 bis 347
- [6] Rummel, K.: Anhaltzahlen für die Wärmewirtschaft. Stahlisen, Düsseldorf 1947, S. 8
- [7] Liesegang, W.: Erfahrungen mit  $H_2$ -Meßgeräten am Hochofen. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 156 und 157

## Gasanalysegeräte auf physikalischer Grundlage

VON ERNST GRIMM

Es ist Aufgabe der Analystechnik, besonders der der Gasanalyse, die Konzentration einer oder mehrerer Komponenten eines Gemisches mit größtmöglicher Genauigkeit und geringer Verzögerung fortlaufend zu ermitteln. Die Möglichkeiten, die eine Gasanalyse bietet, können verschiedener Art sein und lassen sich etwa folgendermaßen zusammenfassen:

1. Überwachung und Registrierung der Konzentration einer oder mehrerer Komponenten eines Gasgemisches zur Kontrolle der Wirtschaftlichkeit und, falls möglich, zur Optimierung eines Prozesses.
2. Rechtzeitiges Erkennen der Bildung explosibler Gemische.
3. Nachweis von Verunreinigungen in Ausgangs- oder Zwischenprodukten, z. B. zum Schutz von Katalysatoren, und Überwachung der Reinheit von Endprodukten.
4. Laufende Ermittlung der Konzentration toxischer Gase in Arbeitsräumen.
5. Analyse von Abgasen zur Vermeidung der Luftverunreinigung.

Die Analyse dient somit der Wirtschaftlichkeit des Prozesses, der Sicherheit von Mensch und Anlage und

dem Schutz der Umgebung vor Verunreinigung. Ihre Bedeutung, die noch ständig zunimmt, ist daraus klar erkennbar.

Es ist zwar im allgemeinen möglich, dem Ablauf eines Prozesses durch Messung und Regelung der Prozeßvariablen Druck, Temperatur, Durchfluß und Flüssigkeitsstand eine gewisse Stabilität zu verleihen, ein Optimum in Bezug auf Qualität und Ausbeute ist damit aber nicht unbedingt verbunden. Schwankende Zusammensetzung der Ausgangsprodukte können Qualität und Ausbeute herabsetzen. Wachsende Kosten und höhere Gewinne für reinere Produkte lassen ein Optimum wünschenswert erscheinen. Analysengeräte sind in der Lage, der Verwirklichung dieser Gedanken zu dienen.

Gasanalysegeräte auf physikalischer Grundlage ziehen zur Messung jeweils eine charakteristische Eigenschaft der gesuchten Komponente heran. Man kann die Verfahren einteilen in spezifische (z. B. die Messung des Sauerstoffes aufgrund seiner paramagnetischen Suszeptibilität, worin er sich von nahezu allen Gasen unterscheidet) und in nicht spezifische (z. B. die Analyse von Gasen aufgrund ihrer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit). Letztere eignen sich im wesentlichen nur für die Analyse von binären oder quasibinären Gas-



gemischen. Die größere Bedeutung kommt naturgemäß den spezifischen Verfahren zu. Die Entwicklung der hier interessierenden Gasanalysegeräte zeigt, daß deren Selektivität stetig verbessert wurde, angefangen von den Wärmeleitfähigkeitsgeräten über die magnetischen Sauerstoffmesser und die Infrarotgeräte bis zu den Chromatographen.

Man kann eine weitere Unterscheidung treffen zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Meßverfahren. Ersteren ist im allgemeinen der Vorzug zu geben, da sie den zeitlichen Verlauf der Konzentration naturgetreuer wiedergeben und sich besser für Regelungszwecke eignen.

Im einzelnen macht man bei der physikalischen Gasanalyse Gebrauch

- a) von der Wechselwirkung zwischen einer Strahlung und dem Gas, z. B. beim Infrarotgerät,
- b) von elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Gase, z. B. vom Paramagnetismus des Sauerstoffs,
- c) von thermischen Eigenschaften der Gase, z. B. von der Wärmeleitfähigkeit,
- d) von chromatographischen Verfahren.

Darüber hinaus kennt man

- e) Verfahren unter Ausnutzung von Zähigkeit und Dichte der Gase,
- f) massenspektrometrische Verfahren,
- g) physikalische Verfahren unter Zuhilfenahme chemischer Hilfsreaktionen.

Nicht alle sich hieraus ergebenden Möglichkeiten sind in kommerziellen Geräten verwirklicht worden, immerhin ist eine große Anzahl Ausführungen erhältlich [1].

In vielen Fällen ist es das Ziel einer gasanalytischen Messung, das Analyseergebnis in die Regelung des Prozeßablaufes eingreifen zu lassen. Dies ist jedoch nur möglich und ratsam, wenn das Analysegerät, abgesehen von seinem Zeitverhalten, neben ausreichender Meßgenauigkeit entsprechend robust und wenig stör anfällig ist. Hier auf wurde bei der Konstruktion der nachstehend beschriebenen Geräte besonderer Wert gelegt.

Die Meßgenauigkeit der Gasanalysegeräte auf physikalischer Grundlage wird, abgesehen von der etwa vorhandenen Querempfindlichkeit gegenüber dem Restgas, in erster Linie von Temperatur und Druck der Umgebung beeinflußt. Die Genauigkeit kann weiterhin beeinträchtigt werden durch Erschütterung, Verschmutzung, Korrosion und Spannungsschwankung. Die letztgenannten Einflüsse können vermieden werden durch geeignete Montage der Geräte, geeignete Aufbereitung des Meßgases und Verwendung von Konstantstromquellen.

Das Meßgas nimmt immer die Temperatur des Analysegerätes an und steht im Gerät unter Atmosphärendruck.

Meist wird die Größe des Meßeffects durch eine Größe bestimmt, die etwa der Molekülzahl der Meßkomponente in der Volumeneinheit proportional ist, und nicht durch den Volumprozentgehalt. Da für betriebliche Belange die Messung in Volumprozenten erwünscht und sinnvoll ist, wird eine Korrektur der Anzeige nach Druck und Temperatur erforderlich.

Die barometrischen Druckschwankungen sind in ihrer Auswirkung klein und können vernachlässigt werden. Lediglich die geografische Höhenlage des Aufstellungs-ortes muß berücksichtigt werden. Temperaturschwankungen dagegen können erhebliche Meßfehler verursachen, und zwar ist es nicht allein der Einfluß auf den Partialdruck, sondern auch die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Meßgröße selbst, die die Genauigkeit beeinträchtigt. Analysegeräte dieser Art müssen daher mit einer automatischen Temperaturkompensation versehen sein, die innerhalb der normal vorkommenden Temperaturschwankungen von  $\pm 15^\circ\text{C}$  wirksam ist. Da diese von der Temperatur ausgehende Beeinflussung rein gesetzmäßig ist, läßt sie sich verhältnismäßig leicht, z. B. mit Hilfe von Halbleitern, kompensieren. Es gibt auch eine ungesetzmäßige Temperaturbeeinflussung, herrührend aus Unsymmetrien im elektrischen oder geometrischen Aufbau des Gerätes, die sich nicht so leicht beseitigen lassen. Die ausschließliche Verwendung von Heizdrahtbrücken zur Erzeugung des elektrischen Signals bei den im folgenden beschriebenen Geräten ermöglicht es, solche Fehler beliebig klein zu machen. Die Meßgenauigkeit eines Gasanalysegerätes wird somit

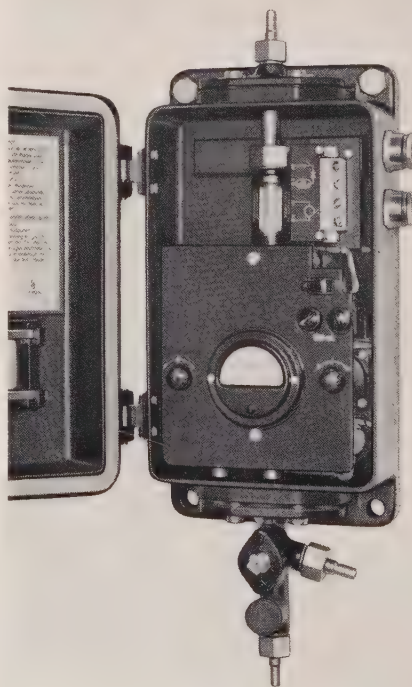


Bild 1 Wärmeleitfähigkeitsgerät mit abgeschlossener Vergleichskammer

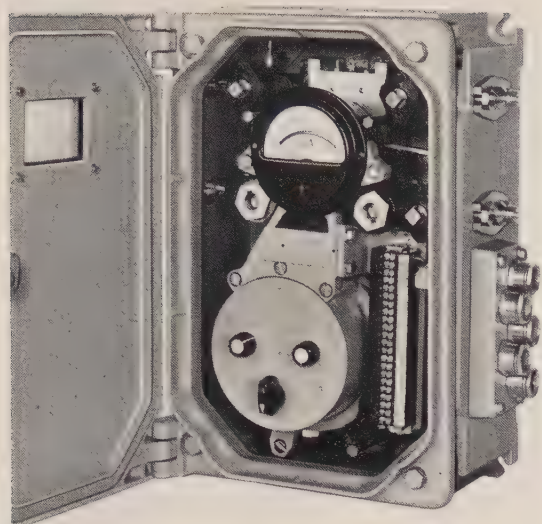


Bild 2 Wärmeleitfähigkeitsgerät in explosionsgeschützter Ausführung

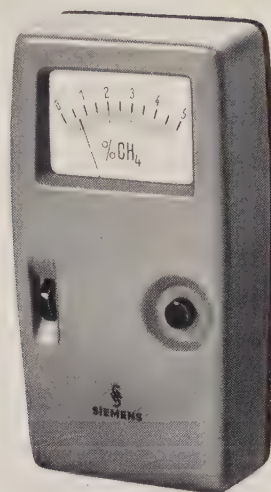


Bild 3 Taschen-Grubengas-messer

sowohl von konzentrationsabhängigen Fehlern als auch von Endwertfehlern bestimmt. Erstere rühren von restlichen Druck- und Temperaturfehlern sowie den Eichtoleranzen her, die Endwertfehler dagegen im wesentlichen von den Toleranzen der Schreiber und Anzeiger. Insgesamt kann man bei Gasanalysegeräten mit einem Fehler von 2 bis 3 % des Endwertes rechnen, für die kleinsten Meßbereiche wird ein Fehler von 5 % zugelassen.

Diese Angabe gilt unter der Voraussetzung, daß die Meßkomponente keine Querempfindlichkeit gegenüber dem Restgas hat. Unter der Querempfindlichkeit versteht man das Verhältnis der Ausschläge von Störkomponente zu Meßkomponente, beide bezogen auf gleiche Konzentration (Konzentrationseinheit). Unter ungünstigen Umständen kann eine solche vorhanden sein. Ihr Einfluß muß dann abgeschätzt werden.

Die Wärmeleitfähigkeitsgeräte [2, 3], deren Verfahren hinlänglich bekannt ist – man vergleicht die Wärmeleitfähigkeit des Meßgases mit der eines geeignet gewählten Vergleichsgases – werden vom Wernerwerk für Meßtechnik in drei Ausführungen gebaut. Bei allen ist die Meßkammer die gleiche: ein massiver Metallklotz mit vier Bohrungen, in denen axial und streng symmetrisch vier Platindrähte ausgespannt sind. Die Geräte gibt es sowohl ohne als auch mit Feuchteausgleicher zur selbsttätigen und wartungsfreien Ausschaltung des Wasserdampfgehalt. Die dritte Ausführung arbeitet mit abgeschlossener Vergleichskammer zur Realisierung unterdrückter Meßbereiche und für die Verwendung beliebiger Vergleichsgase (Bild 1). Durch besondere Maßnahmen konnte in letzter Zeit die Empfindlichkeit der Anordnung so weit gesteigert werden, daß bei Verwendung eines Magnetikverstärkers eine Wärmeleitfähigkeitsänderung von weniger als 0,3 % bereits ausreicht, um den

Bereich auszusteuern, wobei die Störeinflüsse natürlich trotz Verwendung des Verstärkers innerhalb der vorgeschriebenen Toleranzen bleiben. Diese Geräte eignen sich zur Analyse binärer und quasibinärer Gasgemische.

Häufig besteht die Möglichkeit, in nicht binären Gemischen die gesuchte Komponente einer chemischen Umwandlung zu unterziehen. Die »Differenzschaltung« ermöglicht dann eine exakte Messung. So lassen sich durch Verwendung eines Verbrennungsofens mit Platin oder Kupferoxyd viele brennbare Gase und Sauerstoffgehalte in einzelnen Fällen bis hinab zu Meßbereichumfängen von 0,5 % mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. Die Verfahren zeichnen sich aus durch Einfachheit, Robustheit und geringen Aufwand.

Um den Anforderungen in bezug auf Explosionsschutz zu genügen, werden Wärmeleitfähigkeitsgeräte auch in explosionsgeschützter Ausführung\* (Bild 2) gebaut. Sie können mit offener oder mit abgeschlossener Vergleichskammer geliefert werden.

Der Vollständigkeit halber sei ein Gerät erwähnt, das nicht in die Reihe der kontinuierlichen Analysegeräte zu rechnen ist, da es für Stichprobenmessungen gedacht ist. Es wurde entwickelt für die Messung von Methan unter Tage, kann jedoch auch für andere Gase, wie  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  usw., verwendet werden. Grundlage ist ebenfalls die Wärmeleitfähigkeitsmessung; Bild 3 zeigt dieses Gerät.

Das Prinzip [4] des magnetischen Sauerstoffmessers OXYMAT\*\* beruht darauf, daß der Sauerstoff als nahezu einziges aller technisch interessierenden Gase paramagnetisch ist. Diese Eigenschaft nutzt man zur Er-

\* Ex-Schutz beantragt

\*\* Eingetragenes Warenzeichen



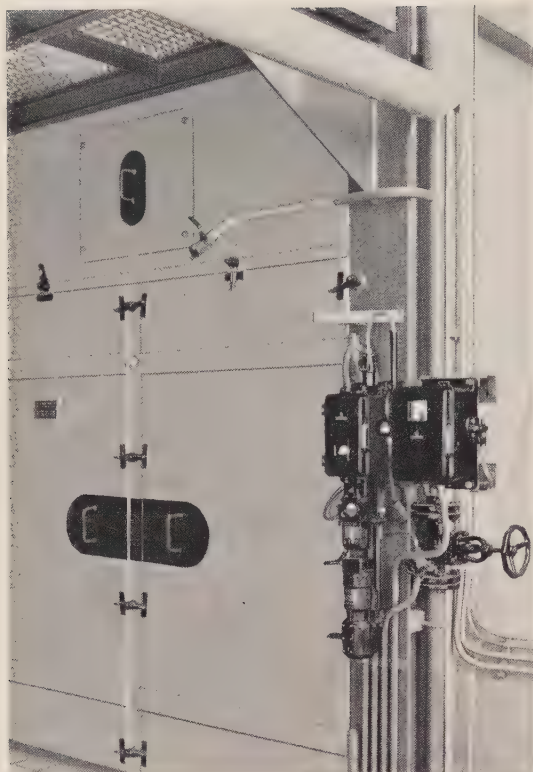


Bild 4 Sauerstoffmesser OXYMAT (rechts) und CO<sub>2</sub>-Messer in einem Kraftwerk

zeugung eines »magnetischen Windes« aus. Die Abkühlung eines Hitzdrahtes durch diesen magnetischen Wind ist ein Maß für den Sauerstoffgehalt. Auch hier wird die Messung auf eine Widerstandsbestimmung zurückgeführt. Das Verfahren ist weitgehend selektiv für Sauerstoff, es bestehen jedoch kleine Querempfindlichkeiten,

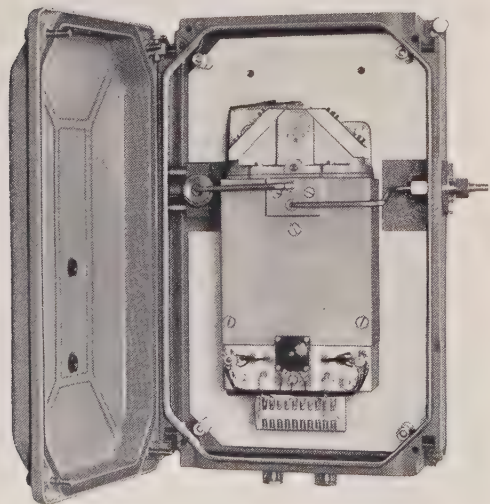


Bild 5 INFRAMETER

so daß bei der Eichung die Gaszusammensetzung bekannt sein muß. Der Sauerstoff kann in allen Gasen bestimmt werden, mit Ausnahme in Wasserstoff und Helium, deren hohe Wärmeleitfähigkeit die Messung stört. Unterdrückte Meßbereiche sind ebenfalls möglich. Zum Schutz gegen Feuchtigkeit kann das Gerät mit einem automatisch wirkenden Trockenvorsatz ausgerüstet werden. Kleinsten ausführbarer Meßbereich ist 0 bis 1 % O<sub>2</sub>. Das Hauptanwendungsgebiet dieses Gerätes (Bild 4) liegt bei der Rauchgasanalyse, doch kann es bei Beachtung der genannten Ausnahme für alle anderen Gasgemische Verwendung finden.

Das INFRAMETER\* [5] stellt eine Neuentwicklung eines nicht dispersiven, auf der Infrarotabsorption beruhenden selektiven Analysegerätes dar. Zur Selektivierung dient das zu messende Gas. Das Gerät (Bild 5) eignet sich für die Analyse vieler infrarotabsorbierender Gase und hat daher einen breiten Anwendungsbereich.

Im Gegensatz zu bereits bekannten Geräten arbeitet das INFRAMETER mit Gleichlicht für die Durchleuchtung der Meßküvetten und mit Widerstandsthermometern in den Empfängerkammern zur Intensitätsmessung. Vier Widerstandsthermometer sind zu einer Brücke geschaltet und steuern einen Magnetikverstärker aus. Das Gerät hat keine bewegten und keine dem Verschleiß unterworfenen Teile und ist daher als sehr robust und betriebssicher anzusehen.

Die Wirkungsweise ist leicht zu übersehen:

Die vom Strahler erzeugte infrarote Strahlung wird über zwei Spiegel durch zwei vom Meßgas beströmte Küvetten in die Empfängerkammern geleitet, die mit Stickstoff oder dem zu analysierenden Gas gefüllt sind. In der einen Kammer ruft die Strahlung eine der Schwächung in der Küvette umgekehrt proportionale Temperaturerhöhung hervor, die mit Widerstandsthermometern gemessen wird. Die Verstimmung der Brücke, zu der die Widerstandsthermometer zusammengefaßt sind, wird auf einen Magnetikverstärker gegeben. Dieser liefert einen eingprägten Strom und bietet damit den Übergang zum TELEPERM\*-Regelsystem.

Ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit des INFRAMETER ist seine hohe Selektivität, die infolge besonderer Maßnahmen auch in Fällen der Bandenüberlappung noch günstige Werte erreichen läßt. So kann bei Bandenüberlappung die Störkomponente in bestimmter Konzentration in beide Empfängerkammern gefüllt werden. Hierdurch wird eine teilweise Kompensation des Störeffektes erreicht. Darüber hinaus ist die Verwendung von Filterküvetten möglich. Das Gerät ist temperaturkompensiert. Spannungs- und Frequenzeinflüsse werden durch geeignete Stromversorgungsgeräte vermieden.

Strahlertemperaturschwankungen werden mit Hilfe einer Kompensationseinrichtung eliminiert, so daß die Ver-

\* Eingetragenes Warenzeichen

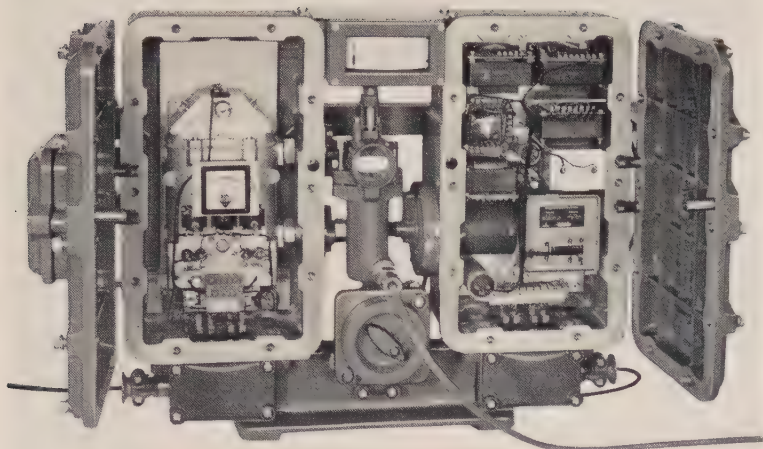


Bild 6 Grubengas-INFRAMETER; links Analysator, rechts Netzgerät, beide in schlagwettergeschütztem Gehäuse

wendung einer Eisendrahtlampe nur noch bei großen Frequenzschwankungen notwendig ist.

Erprobungen in den verschiedenen Industriezweigen und unter rauen Bedingungen haben gezeigt, daß das Gerät allen Anforderungen gewachsen war. Es zeichnet sich durch langzeitige Konstanz des Nullpunktes und der Empfindlichkeit aus und bedarf daher kaum einer Wartung. Aus diesem Grund ist es auch für Regelungszwecke gut geeignet. Bild 5 zeigt das Gerät in geöffnetem Zustand, Bild 6 eine schlagwettergeschützte Ausführung für die Messung von Methan unter Tage.

Alle diese Geräte lassen sich in nahezu beliebiger Weise mit Auswertegeräten kombinieren. In Fällen geringer Ausgangsleistung bei den kleinsten Meßbereichen stehen robuste Magnetikverstärker, die keiner Wartung bedürfen, zur Verfügung. An diese können TELEPERM-Regler und elektropneumatische Regler angeschlossen werden. Für Zweipunktregelung oder zur Signalisierung ist der vielseitige NZT-Regler geeignet.

Von entscheidender Bedeutung für die einwandfreie Funktion der Geräte sind die Art der Entnahme und die Aufbereitung des Gases. Auch hierfür stehen umfangreiche Hilfsmittel zur Verfügung, auf die in einem besonderen Aufsatz eingegangen wird [6].

Abweichend von den bisher genannten Geräten sind die im folgenden beschriebenen Gas-Chromatographen diskontinuierlich arbeitende Geräte. Sie werden daher zunächst überwiegend im Laboratorium verwendet.

Die große Verbreitung, die die Gas-Chromatographie in wenigen Jahren gefunden hat, liegt darin begründet, daß

dieses verhältnismäßig einfache Verfahren die Durchführung vollständiger Analysen von komplizierten Gas- und Flüssigkeitsgemischen ermöglicht mit einer Genauigkeit und einem Minimum an Zeitaufwand, wie es andere Methoden bei weitem nicht erreichen lassen. Das Verfahren ist kurz folgendes:

Einem Trägergasstrom, der über eine Trennsäule läuft, wird kurz vor Eintritt in die Säule eine kleine Menge des zu analysierenden Gases zugemischt. In der Trennsäule erfahren die einzelnen Komponenten des Gemisches infolge Wechselwirkung mit dem Füllmaterial der Säule verschiedene Verzögerungen in bezug auf ihre Laufzeit. Sie kommen daher getrennt aus der Säule heraus und werden als binäres Gemisch mit dem Trägergas in einem Detektor, in den meisten Fällen einer Wärmeleitfähigkeitskammer, sowohl qualitativ

durch die Laufzeit als auch quantitativ durch den Ausschlag nachgewiesen. Flüssigkeiten werden vor der Eingabe in die Säule verdampft.

Flüssigkeiten und Gase können im Prinzip mit dem gleichen Gerät analysiert werden. Es zeigt sich jedoch, daß die Anforderungen, die an die Geräte zu stellen sind, etwas voneinander abweichen. Gase werden im allgemeinen bei oder in der Nähe der Raumtemperatur chromatographiert, Flüssigkeiten bei einer dem Siedepunkt angepaßten Temperatur. Für die Analyse von Flüssigkeiten genügt eine, bestenfalls zwei Trennsäulen, für die Vollanalyse eines Gasgemisches benötigt man unter Umständen drei bis fünf Trennsäulen. Aus diesen Gründen erschien es zweckmäßig, für die Flüssigkeits- wie für die Gasanalyse je ein Gerät vorzusehen, das dann optimal angepaßt werden kann.

Der Präzisions-Gas-Chromatograph [7] (Bild 7) ist für den Einbau von fünf verschiedenen Trennsäulen eingerichtet, die durch metallene Umschalthähne in den Trägergasstrom eingeschaltet werden können. Deshalb ist der Säulenwechsel in Sekundenschnelle möglich, vor allem auch dadurch, daß die folgende Säule bereits mit Trägergas vorgespült werden kann. Der Detektor ist eine neu entwickelte Wärmeleitfähigkeitskammer mit geringem Volumen und erheblich gesteigerter Empfindlichkeit. Die Nachweisgrenze liegt bei wenigen ppm. Die Gasdosierung arbeitet mit großer Genauigkeit nach einem besonderen Vakuumdosierverfahren, das außerdem nur wenige Kubikzentimeter der Gasprobe erfordert. Es besteht die Möglichkeit, auch Säulen außerhalb des Thermostaten zu betreiben, die in besonderen Kühlgefäßen untergebracht werden können.

Das Gerät eignet sich somit vorzugsweise für die Analyse der meisten gasförmigen Kohlenwasserstoffe und einer



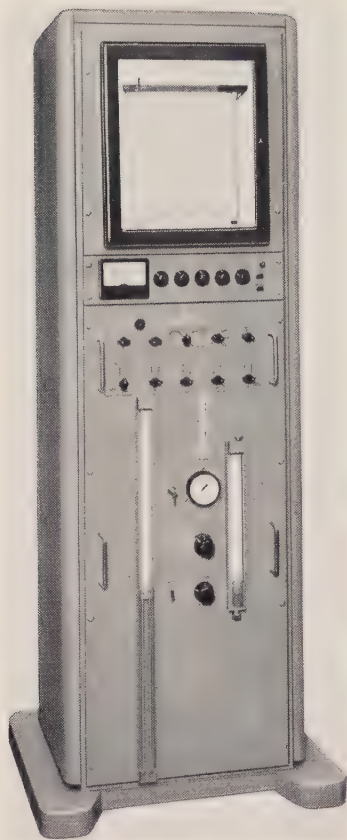


Bild 7 Präzisions-Gas-Chromatograph



Bild 9 Universal-Gas-Chromatograph

großen Anzahl anorganischer Gase. Es ist geeignet, die Orsatanalyse in vielen Fällen zu ersetzen, und ist besonders wirtschaftlich bei der Durchführung von Routineanalysen. Die Analyse von Flüssigkeiten bis zu einem Siedepunkt von etwa 100 °C ist ebenfalls möglich.

Häufig besteht der Wunsch, den Analysenvorgang automatisch ablaufen zu lassen. Für diesen Zweck wurde als Ergänzung eine automatische Dosiereinrichtung (Bild 8) geschaffen, die ohne großen Aufwand in Klarschrift und ohne Empfindlichkeitsumschaltung die Analyse in beliebigen Zeitabständen automatisch ablaufen läßt.



Bild 8 Automatische Dosiereinrichtung für den Präzisions-Gas-Chromatographen

Der Universal-Gas-Chromatograph (Bild 9) ermöglicht die Analyse von Flüssigkeiten bis zu Siedepunkten von etwa 300 °C. Seine Besonderheit und seine Anpaßbarkeit an das Meßproblem beruhen darauf, daß er zwei voneinander unabhängige Thermostaten hat, von denen jeder bis auf 250 °C heizbar ist. Jeder Thermostat enthält eine Trennsäule, in dem einen der beiden befinden sich außerdem der Detektor und die von außen gesteuerten Ventile für die Säulenumschaltung. Mit deren Hilfe können die Trennsäulen einzeln oder hintereinander vor den Detektor geschaltet werden. Weiterhin ist der Einbau von Absorptions- und Hydriersäulen sowie von präparativen Säulen in den geräumigen Thermostaten leicht möglich. Ein Fraktionssammelsystem ermöglicht die Probenahme im Thermostatenraum. Als Detektor wird eine Wärmeleitfähigkeitskammer neuer Konstruktion verwendet. Eine Dosiereinrichtung für Flüssigkeiten und Gase ist eingebaut. Das Vor-

handensein von zwei Thermostaten ermöglicht eine vielseitige und zeitsparende Arbeitsweise.

Fallen zahlreiche Chromatogramme an, so erfordert deren Auswertung viel Zeit und Personal. Eine automatische Integrationseinrichtung [8] erleichtert in einem solchen Falle die Auswertung, erhöht deren Genauigkeit und bringt erhebliche Zeitersparnis.

#### Schrifttum

- [1] Keulemans, A.I.M. und Rademaker, Ir. O.: New Developments in Analysis Instrumentation on the Continent of Europe. Instrumental Methods of analysis Symposium, Montreal, Canada
- Hobbs, A.P.: Gas Analysis. Analytical chemistry, Vol. 30, Nr. 4
- [2] Naumann, A. und Schneider, E.: Verbesserte Gasanalysegeräte nach dem Wärmeleitverfahren. Siemens-Zeitschrift 27 (1953) 8 bis 18
- [3] Naumann, A. und Schneider, E.: Gasanalyse durch Wärmeleitmessung mit abgeschlossener Vergleichskammer. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 387 bis 389
- [4] Naumann, A.: Ein Sauerstoffmesser auf magnetischer Grundlage. Siemens-Zeitschrift 26 (1952) 134 bis 140
- [5] Naumann, A. und Schulz, G.: Das INFRAMETER, ein neues Betriebsgerät zur Infrarot-Gasanalyse ohne spektrale Zerlegung. Chemie-Ingenieur-Technik 32(1960) 669 bis 674
- [6] Naumann, A.: Die Gasentnahme für industrielle Analysegeräte. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 407 bis 415
- [7] Oster, H.: Ein Präzisions-Gas-Chromatograph für das Betriebslaboratorium. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 137 bis 144
- [8] Kürner, H.: Ein Digital-Auswertegerät für Gas-Chromatographen. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 430 bis 433

## Überwachung kontinuierlicher Prozesse durch zyklische Grenzwertkontrolle

VON GERHARD BOCK UND HANS-JOACHIM KRÜGER

Kontinuierliche Prozesse überwacht und führt man heute in der Regel von Meßwarten aus, in denen die gesamte Information über den Zustand der Anlage zusammengefaßt wird. Die Information gewinnt man über Meßfühler an Orten, an denen man die charakteristischen Phasen des Prozesses erfassen kann. Die elektrischen oder auch pneumatisch-elektrischen analogen Ausgangswerte dieser Meßfühler werden als Gleichspannungen oder Gleichströme auf Anzeige- oder Registriergeräte geführt. Bei großen Produktionsanlagen, insbesondere der chemischen Industrie, kann die Anzahl der vom Personal in den Meßwarten zu überwachenden Instrumente so groß sein, daß die Gefahr besteht, daß Störungen im Prozeßablauf zu spät oder nicht erkannt werden. Das Wartepersonal kann also im Störfall durch die Menge der anfallenden Informationen überfordert sein. Dieser Schwierigkeit ist nur sehr bedingt durch eine Erhöhung des Personalstandes in den Warten zu begegnen, weil es stets einer sehr gut aufeinander eingespielten Arbeitsgruppe bedarf.

Aus dieser Lage heraus entsteht die Forderung, die anfallende Information nach Wichtigkeit zu stufen und nur den wichtigen Informationsanteil ständig überwachen zu lassen. Für den normalen Betriebsablauf kann man in den meisten Fällen sehr leicht aus der Technologie des Prozesses die wichtigen Meßstellen auswählen und deren Anzeigergeräte besonders kenntlich machen oder durch ihre räumliche Anordnung in der Warte hervorheben. Anders verhält es sich jedoch, wenn der Prozeßablauf gestört ist. Jeder wichtige Meßwert hängt dann von einigen anderen ab, die als weniger wichtig so lange außer Betracht bleiben dürfen, wie der wichtige Wert sich innerhalb zulässiger Grenzen bewegt. Im Störfall muß also eine ganze Anzahl zusätzlicher Meßwerte zur Beurteilung mit herangezogen werden. In vielen Fällen tritt sogar im Störfall eine Verschiebung in der Reihenfolge der Wichtigkeit der Meßstellen ein.

Daraus folgt, daß für einen Störfall die Wichtigkeit einer Meßstelle nicht von vornherein festgelegt werden kann. Es werden alle Meßstellen bedeutsam, deren Werte außerhalb vorgegebener Toleranzen liegen. Daher muß das Wartepersonal als erste Informationsstufe wissen, ob und welche Werte eine unzulässige Abweichung erreicht haben. In der zweiten Informationsstufe

gilt es, den Betrag des abweichenden Meßwertes zu erfahren. Die erste Informationsstufe kann man nicht wie die zweite dem Meßwert selbst entnehmen, sondern erreicht sie lediglich durch einen Vergleich mit vorgegebenen Werten. Es stellt sich hier die Aufgabe, die anfallenden Informationen [1] zu reduzieren, um die Prozeßführung wesentlich zu erleichtern und um den Personalstand in den Warten so klein wie möglich halten zu können. Es wird später noch gezeigt, wie man diese Aufgabe mit anderen Aufgaben des Messens und der Meßwertverarbeitung [2] verknüpfen kann.

### Eine zyklische Grenzwertkontrollanlage für kontinuierliche Prozesse

Man kann den Grenzwertvergleich in der Weise durchführen, daß man Anzeiger mit einstellbaren Grenzwerten verwendet [3]. Läuft der Zeiger über einen solchen Grenzwert, so wird – je nach Richtung des Durchlaufs – eine Signallampe ein- oder ausgeschaltet oder auch zusätzlich ein akustischer Alarm ausgelöst.

Sind mehr als etwa 30 bis 50 Meßstellen zu überwachen, so ist es wirtschaftlicher, eine zentrale Anlage statt einzelner Einrichtungen vorzusehen. Unter Umständen kann

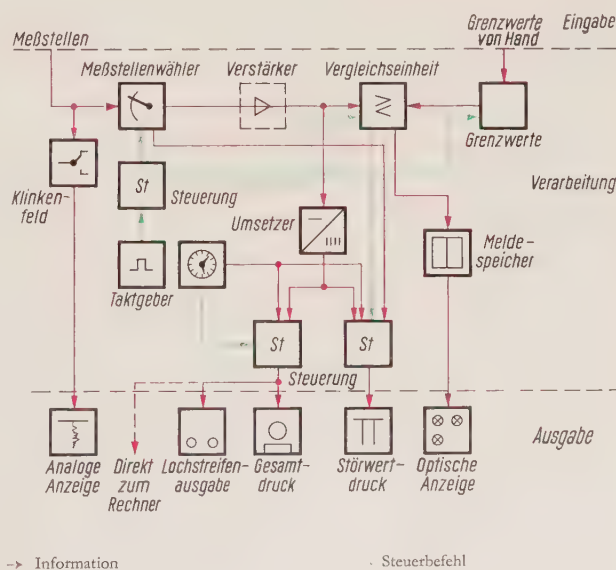


Bild 1 Schema einer Anlage zur zyklischen Grenzwertkontrolle



man dann sogar auf Anzeigeeinstrumente verzichten, wenn die zentrale Anlage in der Lage ist, auch den Betrag der außerhalb ihrer Grenzen befindlichen Meßwerte zu vermitteln (zweite Informationsstufe).

Zentrale Anlagen zur Grenzwertkontrolle arbeiten zyklisch. Soll die zyklische Grenzwertkontrolle der ununterbrochenen Überwachung gleichwertig sein, so darf die Dauer eines Kontrollzyklus nicht zu groß sein. Die Zyklusdauer ergibt sich aus der Zeit, in der ein Meßwert kontrolliert wird, multipliziert mit der Anzahl der zu überwachenden Werte. Die Kontrollzeit für einen Wert hängt vom Bereich und von der Beschaffenheit seines zu kontrollierenden elektrischen Wertes ab, worauf am Schluß noch näher eingegangen wird. Sie kann zwischen 0,1 und 1 s je Wert betragen. Legt man eine Zeit von 0,5 s/Wert zugrunde, so ergibt sich für 100 Meßwerte als Zyklusdauer 50 s. In der Regel dürfte diese Zeit für die meisten chemischen Prozesse ausreichend sein, da ja deren Zeitverhalten, beispielsweise verglichen mit Anlagen der Gewinnung und Verteilung elektrischer Energie, sehr langsam ist.

Bild 1 zeigt, wie sich eine Grenzwertkontrollanlage an einen Prozeß angliedert. Alle Verbindungsleitungen von den Meßstellen zur Kontrollanlage führt man über ein Klinkenfeld mit einer Trennklinke je Meßstelle (Bild 2). Dadurch schafft man die Möglichkeit, bei Bedarf Meßstellen durch Blindstecker von der Kontrollanlage abzutrennen oder sie über Stöpselschnüre mit Anzeigern oder Schreibern zu verbinden. Hiervon sollten fünf bis zehn Stück je nach Größe der zu überwachenden Anlage vorhanden sein. Diese Geräte kann man einsetzen, um den zeitlichen Verlauf des Wertes bestimmter Größen zu be-

obachten oder aufzuzeichnen. Man wird die Geräte mit einheitlichen Skalen versehen, die von 0 bis 100% beschriftet sind, um sie für jede beliebige Meßstelle verwenden zu können.

Die dem Klinkenfeld nachgeschaltete Grenzwertkontrollanlage vergleicht die nacheinander von ihr ausgewählten Meßwerte mit vorgegebenen Vergleichswerten. Zum Einstellen der Vergleichswerte sieht man entweder einen Zahleneinsteller je Meßwert oder auch je Meßwertgruppe vor. Es besteht auch die Möglichkeit, jedem Meßwert zwei Grenzwerte zuzuordnen und ihn auf Minimum und Maximum zu überwachen.

Die aufgrund der Vergleiche von der Anlage getroffenen Entscheidungen werden auf Signallampen angezeigt, von denen jeder Meßstelle eine zugeordnet ist. Akustische Alarmer können gleichzeitig ausgelöst werden. Die Grenzwertsignallampen kann man beispielsweise mit dem Klinkenfeld auf einer Tafel zusammenfassen (Bild 2) oder auch in einem Betriebsschaubild zusammen mit den Grenzwerteinstellern anordnen.

Der Betrag eines von der Kontrollanlage als vom Grenzwert abweichend erkannten Meßwertes wird auf einem Banddrucker (Bild 3), mit Uhrzeit und Meßstellen-Kennzeichen versehen, gedruckt. Kehrt der Meßwert in seinen normalen Bereich zurück, so wird er abermals gedruckt, jedoch wird dies durch ein Zusatzzeichen gekennzeichnet. Das Protokoll des Banddruckers weist also alle Störungen des Prozeßablaufs und deren Ende nach Zeit und Betrag für jede an der Störung beteiligte Meßstelle aus.

An die Grenzwertkontrollanlage können auch andere Meßwertverarbeitungsanlagen oder auch ein elektroni-



Bild 2 Klinkenfeld und Signaltafel einer Anlage für zyklische Grenzwertkontrolle an einem Reaktor



Bild 3 Ausgabegeräte einer Anlage für zyklische Grenzwertkontrolle

scher Rechner angeschlossen werden. So ist es möglich, eine Meßwertdruckeranlage [4] mit Meßwertblattschreiber (Bild 3) nachzuschalten, die alle kontrollierten Meßwerte bestimmter Zyklen auf automatischen oder Handanreiz hin in Tabellenform druckt, und zwar unabhängig davon, ob eine Störung vorliegt oder nicht. Tritt eine Störung ein, so werden diese Werte rot gedruckt. Die Maschine übernimmt so das Führen des Betriebsjournals. Eine Ausgabe auf Lochstreifen ermöglicht es, alle Meßwerte bestimmter Zyklen, etwa jedes fünften oder zehnten Zyklus, aufzunehmen und zu speichern. Das so gewonnene statistische Material kann einem elektronischen Rechner zugeführt werden und von ihm als Grundlage für die mannigfaltigsten weiteren Verarbeitungen verwendet werden. So könnten zum Beispiel Korrelationrechnungen zur Ermittlung günstigerer Arbeitsprogramme für die überwachte Prozeßanlage ausgeführt werden. Auch die Lösung betriebswirtschaftlicher Aufgaben könnte der Rechner übernehmen. Hierfür braucht die Rechenanlage nicht in unmittelbarer Nähe der Prozeßanlage zu stehen, denn die im Lochstreifen enthaltene Information kann auch über einen FS-Kanal ins Rechenzentrum übermittelt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, den Rechner direkt an die Grenzwertkontrollanlage anzuschließen, sofern die Struktur der Rechenanlage dies erfordert.

#### **Aufbau einer Anlage zur zyklischen Grenzwertkontrolle**

Aus den vorhergehenden Ausführungen ergibt sich, daß oft eine zentrale Anlage zur zyklischen Grenzwertkontrolle wirtschaftlicher arbeitet als einzelne Meßgeräte.

Der Aufbau einer solchen Anlage ist bereits in Bild 1 gezeigt. Die Meßstellen, die an den Meßstellenwähler an-

geschlossen sind, werden nacheinander an die zentrale Vergleichseinheit geschaltet. Je nach Art der Meßgrößen wird ein zentraler Meßverstärker oder ein Umformer dazwischengeschaltet, der die Meßgröße in eine für den Vergleich günstige Gleichspannung umwandelt. Mit der Meßgröße muß gleichzeitig der richtige Vergleichswert an die Vergleichseinheit gelegt werden, die dann die Entscheidung trifft, ob der Meßwert innerhalb oder außerhalb des Toleranzbereiches liegt.

Der Vergleichsvorgang arbeitet taktgesteuert. Die dazu notwendigen Impulse werden aus einem Taktgeber gewonnen, der auch noch die Impulse für die Fortschaltung des Meßstellenwählers liefert.

Überschreitet bei dem Vergleich ein Meßwert seine Grenze, so kann dies, wie erwähnt, in verschiedenen Arten gemeldet werden: z. B. durch akustische Warnung, durch Aufleuchten oder Blinken von Lampen in einem Blindschaltbild oder durch Störwertdruck. In letzterem Fall ist es notwendig, die analog vorliegende Meßgröße in die digitale Form [5, 6] umzusetzen, die die Druckeinrichtung braucht, und die Nummer der Meßstelle am Meßstellenwähler zu erfassen. Zur Kennzeichnung des Zeitpunktes und der Art der Störung werden Uhrzeit und ein Kennzeichen mitgedruckt. Zur optischen Anzeige der gestörten Meßstellen ist ein Meldespeicher eingebaut, der so lange Grenzwertüberschreitungen der einzelnen Meßstellen speichert, bis sich bei einer der ständig wiederholten Kontrollen gezeigt hat, daß die Meßwerte wieder innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Die Grenzwertkontrollanlage ist aus Relais und elektronischen Bauteilen aufgebaut. Der Grund für diesen gemischten Aufbau liegt in den unterschiedlichen Beanspruchungen der Bauteile. Im Meßstellenwähler und im Meldespeicher kann innerhalb eines Durchlaufes jedes Relais nur einmal betätigt werden. Die Steuerung für den Grenzwertvergleich und der Taktgeber werden dagegen bei der Kontrolle jedes einzelnen Meßwertes verwendet. Diese wesentlich größere Beanspruchung macht einen elektronischen Aufbau erforderlich. Dagegen sind für die Durchschaltung von Meßspannungen Relaiskontakte die zweckmäßigsten Schaltelemente. Bild 4 zeigt die in einem Schrank zusammengefaßten Bauteile einer Anlage.

Nun sollen die wichtigsten Geräte und deren Wirkungsweise kurz erläutert werden.

#### **Vergleichsschaltung**

Die Meßwerte werden mit den Vergleichswerten analog verglichen. Hierzu müssen Meßgrößen, wie Wechselspan-



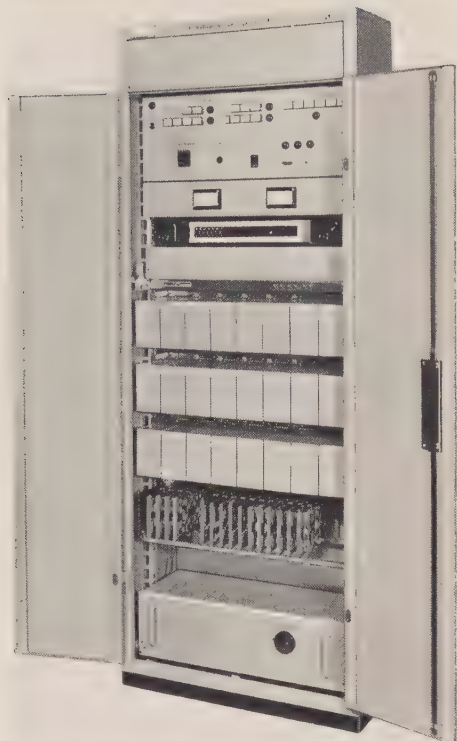


Bild 4 Schrank mit den zentralen Bausteinen einer Anlage für zyklische Grenzwertkontrolle

nungen oder Impulsfrequenzen, in Gleichspannungen umgeformt werden. Liegt dagegen eine Meßgröße bereits als Gleichspannung vor, so muß sie nur verstärkt oder geglättet werden. Diese Verstärker und Umformer werden zentral eingesetzt. Allerdings müssen dann auch kleine Spannungen störungsfrei über den Meßstellenwähler durchgeschaltet werden. Hierauf wird noch im folgenden Abschnitt eingegangen.

Ein digitaler Vergleich wäre ebenso möglich, erfordert aber gegenüber dem analogen Vergleich einen wesent-

lichen Mehraufwand. Die Genauigkeit des Vergleiches würde dabei auch nicht gesteigert werden, da sie nur von der Empfindlichkeit des verwendeten Nullverstärkers abhängt.

Die Vergleichseinheit enthält einen Satz Vergleichswiderstände, aus denen die verschiedenen Grenzwerte mit Zahleneinstellern gebildet werden.

Eine Vergleichseinheit (Bild 5) enthält den Vergleichsverstärker und die Relais, mit denen zweistellige Grenzwerte eingestellt werden können.

#### Meßstellenwähler

Der Meßstellenwähler ermöglicht das Durchschalten der Meßwerte an die zentrale Vergleichseinheit. Er wird von Impulsen gesteuert, die durch Untersetzung der Taktgeberimpulse entstehen. Der Wähler ist als Koppelfeldwähler ausgeführt. Er besteht aus dem Koppelfeld, das aus Edelmetall-Schnellrelais aufgebaut ist, und aus den Ansteuerungs-Ringzählern, die die Spannung an das Koppelfeld legen. Die Ansteuerung ist infolge der großen Schalthäufigkeit elektronisch aufgebaut. Kleine Meßspannungen werden mit zusätzlichen Relais durchgeschaltet, die von den Koppelfeldrelais betätigt werden. Ihre Kontakte bestehen aus einer Speziallegierung, deren Thermospannungen kleiner als  $5 \mu V$  sind.

Außer dieser reinen Durchschaltaufgabe hat das Koppelfeld den zugehörigen Zahleneinsteller mit der Vergleichseinheit zur Bildung des entsprechenden analogen Vergleichswertes zu verbinden. Gleichzeitig wird das zugehörige Speicherrelais im Meldespeicher geschaltet.

#### Meldespeicher

Die Entscheidung, bei welcher Meßstelle ein Grenzwert überschritten ist, nimmt der Meldespeicher auf. Setzt man voraus, daß sich die Meßgrößen in bezug auf die Kontrollgeschwindigkeit nur langsam ändern, so genügt es, für jede Meßstelle ein Relais zu verwenden, das anspricht, wenn ein oberer oder ein unterer Grenzwert überschritten ist. Für den Fall einer Grenzwertkontrolle nach beiden Seiten können dann folgende Entscheidungen hergeleitet werden:

- Wiederholte Störung oben
- Erste Störung oben
- Gut
- Rückgang
- Erste Störung unten
- Wiederholte Störung unten

Sie ergeben sich aus der neuen Entscheidung der Vergleichseinheit und aus dem Ergebnis der vorhergehenden Grenzwertkontrolle.

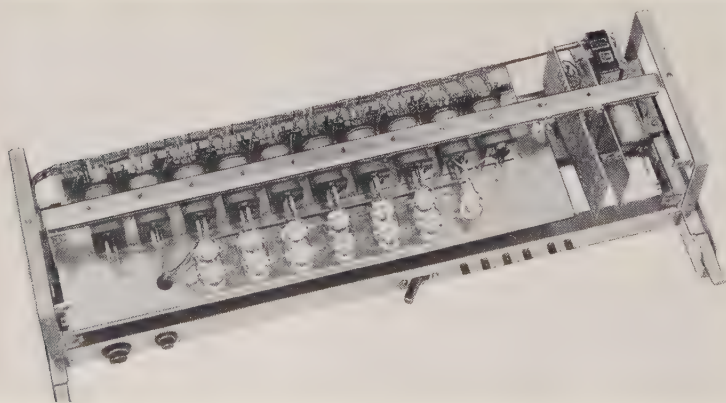


Bild 5 Vergleichseinheit

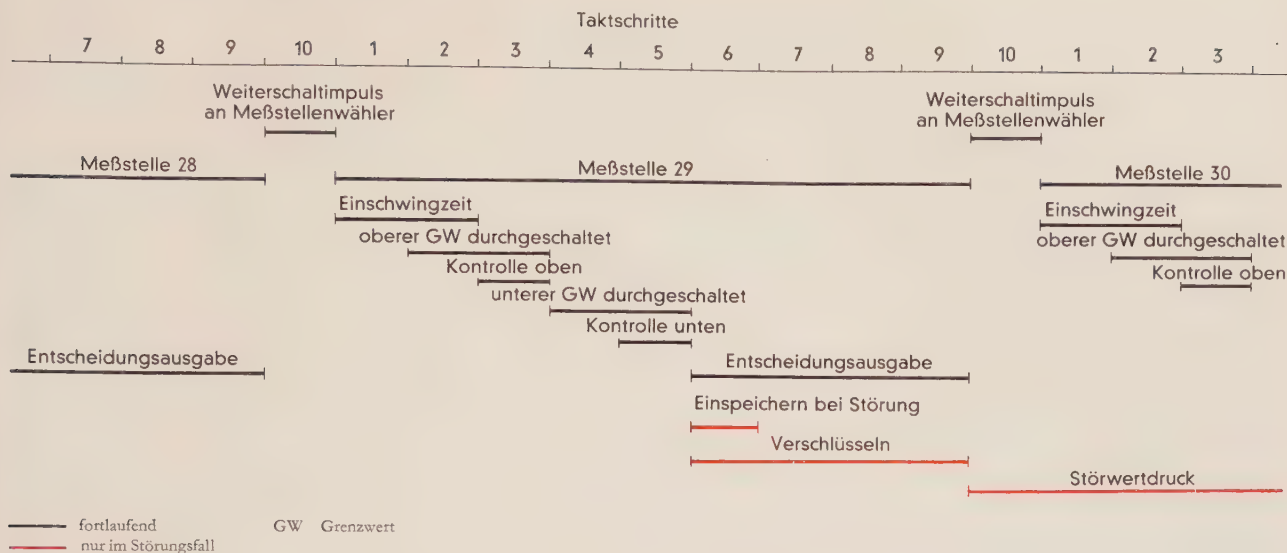


Bild 6 Zeitlicher Ablauf einer Grenzwertkontrolle nach zwei Grenzwerten

Diese Entscheidungsausgabe macht es möglich, optische Signale verschiedenen Gefahrengrades zu unterscheiden. Wird zusätzlich ein Störwertprotokoll gedruckt, so können z. B. lediglich Entscheidungen »Erste Störung nach oben« gedruckt werden, wogegen Entscheidungen »Wiederholte Störungen nach oben« unterdrückt werden.

### Steuerung der Grenzwertkontrolle

Wie erwähnt, arbeitet die Anlage taktgesteuert. Hierzu werden Impulse des Taktgebers mit einem Ringzähler so untersetzt, daß nur jeder zehnte Impuls den Meßstellenwähler auf die nächste Meßstelle weiterschaltet. Die dazwischenliegenden Impulse werden zur Steuerung der Vergleichseinheit und der Entscheidungsausgabe und zur Ansteuerung des Störwertdruckers ausgenutzt. Bild 6 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf einer Grenzwertkontrolle.

Störungen in der Steuerung der Grenzwertkontrollanlage können schwerwiegende Folgen nach sich ziehen. Deshalb werden die wichtigsten Geräte, wie zum Beispiel die Ringzähler, dauernd kontrolliert, damit auftretende Störungen sofort gemeldet werden. Die Kontrollschaltungen sind dabei so ausgelegt, daß sich Störungen weitgehend selbst beheben. Für Prüfzwecke kann der Taktgeber abgeschaltet werden. Gesteuert wird dann durch Impulse, die von Hand einzugeben sind. Damit ist eine schnelle Eingrenzung von Störungen möglich.

### Kontrollzeiten

Die Kontrollzeit für eine Meßstelle hängt im wesentlichen von der Eingangsgröße ab. Die erforderlichen Ver-

stärker haben Einschwingzeiten, die die Kontrollzeit u. U. verlängern. Eine weitere Größe, die in die Kontrollzeit eingeht, ist die Zeit, die zum Ausdrucken einer Grenzwertüberschreitung erforderlich ist. Beim Störwertdruck werden für eine Meßstelle 350 ms, beim Gesamtdruck 500 ms einschließlich der erforderlichen Zusatzzeichen benötigt.

Damit zeigt es sich, daß die schnellsten Kontrollzeiten von 100 ms nur dann erreicht werden können, wenn die Meßgrößen nicht verstärkt zu werden brauchen und nur optisch in einem Betriebsschaubild angezeigt werden. Bei Störwertdruck und Verstärkung der Meßgröße ist die kürzeste Kontrollgeschwindigkeit 350 ms. Es ist aber auch eine schnelle Kontrolle möglich, die mit einem verlangsamen Störwertdruck kombiniert ist. Hierzu wird beim Drucken die Frequenz des Taktgebers verlangsamt. Das gleiche gilt naturgemäß auch für nachgeschaltete Verarbeitungsanlagen, wie zum Beispiel Meßwertdrucker und Rechner, wenn deren Zugriffszeit größer als die Kontrollzeit sein sollte.

### Schrifttum

- [1] Weber, E.: Datenreduzierung durch Meßwertverarbeitung. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 690 bis 693
- [2] Weber, E.: Meßwertverarbeitung. Elektrotechnische Zeitschrift A **78** (1957) 775 bis 778
- [3] Kalusche, H. und Stigler, V.: Ein elektronischer Grenzwertmelder. Siemens-Zeitschrift **31** (1957) 516 bis 518
- [4] Kürner, H.: Der Meßwertdrucker – eine programmgesteuerte Einrichtung zur Meßwertverarbeitung. Siemens-Zeitschrift **31** (1957) 572 bis 576
- [5] Kürner, H.: Digitale Meßmethoden als Grundlage der selbsttätigen Meßwert-Verarbeitung. Automatik **5** (1960) 362 bis 370
- [6] Schneider, H.: Digitale Meßtechnik. Elektronik **7** (1958) 201 bis 212



## Prozeßsteuerungen

VON HORST KALTENECKER

Unter Prozeßsteuerungen sollen im folgenden die Steuerungen diskontinuierlicher Prozesse verstanden werden. Der Ablauf einer Steuerung sei, wie in Bild 1 dargestellt, einem Regelkreis ähnlich in sich geschlossen [1].

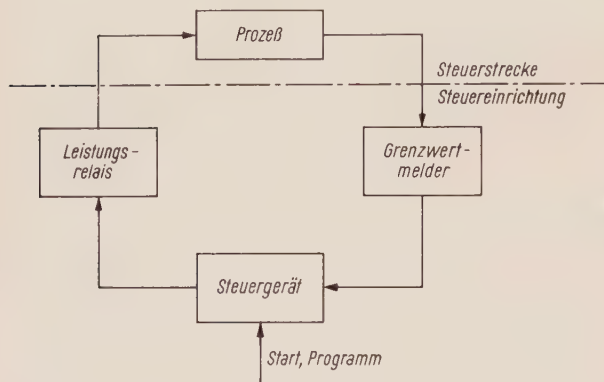


Bild 1 Blockschaltung einer Prozeßsteuerung

Eine Prozeßsteuerung besteht aus dem zu steuernden Prozeß und der Steuereinrichtung. Die Steuereinrichtung enthält Grenzwertmelder [2], um charakteristische Prozeßzustände in ein Signal umzuformen (Eingangssignalumformer des Steuergerätes). Die Signale werden im Steuergerät verarbeitet und führen zu Entscheidungen, die über Leistungsrelais [3] (Ausgangssignalumformer des Steuergerätes) auf Stellglieder des Prozesses wirken.

Die Aufgabe einer Prozeßsteuerung ist es, den Prozeß weitgehend ohne menschlichen Eingriff ablaufen zu lassen. Man verringert dabei den Bedarf an Arbeitskräften und gewinnt außerdem durch ein festgelegtes Programm einen sicheren Ablauf des diskontinuierlichen Betriebes. Zum sicheren Ablauf gehört in der Regel auch eine Überwachung der Steuerung, um anomale Betriebszustände zu signalisieren oder im Ernstfall die Anlage abzuschalten [4].

Prozeßsteuerungen müssen den jeweiligen Aufgaben angepaßt werden. Insbesondere ist die sorgfältige Aufstellung des Programms erforderlich, da sich hier ein Fehler bis zur Inbetriebnahme verbergen kann. Ein weiteres Problem liegt darin, daß manche Verfahren noch

nicht ausreichend genug bekannt sind, so daß Änderungen am Steuergerät während der Inbetriebnahme notwendig werden können. Das Steuergerät muß deshalb flexibel im Aufbau sein.

Weitere betriebliche Forderungen für Steuergeräte sind: Leichte Wartung, einfaches Erkennen von Fehlern und rascher Austausch von schadhafte Bauelementen.

Diese Forderungen lassen sich einfach erfüllen, wenn man das Steuergerät aus Funktionsgruppen aufbaut. Eine Funktionsstörung im Steuergerät weist dann auf die ausgefallene Funktionsgruppe hin. Die Größe dieser Gruppen muß sorgfältig gewählt werden. Sind die Gruppen zu groß, so wird die Fertigung unwirtschaftlich und das Auswechseln schwierig. Sind die Gruppen so klein, daß in der Regel mehrere für einen Funktionsfehler verantwortlich sein können, dann ist die Fehlersuche erschwert.

Größere Prozeßsteuerungen sind heute in Relais- und Transistortechnik bekannt. Die Vor- und Nachteile von Relais und Transistoren als Bauelemente sind in zahlreichen Veröffentlichungen diskutiert worden. Hier sollen lediglich die Gesichtspunkte herausgestellt werden, die die Transistortechnik für Prozeßsteuerungen besonders geeignet erscheinen lassen: wartungsfreie Baugruppen, da keine elektromechanisch beweglichen Teile vorhanden; geringer Leistungsbedarf; geringer Raumbedarf; Möglichkeit eigensicherer Schaltungen; hohe

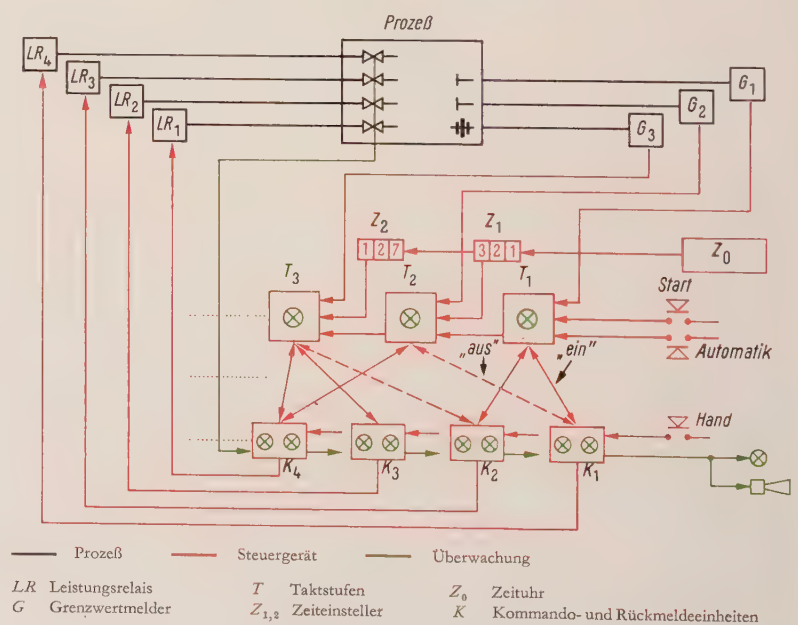


Bild 2 Taktsteuerung

Schaltgeschwindigkeiten (besonders erforderlich bei Zähl-, Rechen- und Sicherheitsaufgaben); Lebensdauer unabhängig von Schalthäufigkeit; einfache Ausführung von Funktionsbaugruppen (gedruckte Schaltung). Diesen Vorzügen stehen dafür einige Nachteile gegenüber, wie: galvanische Trennung nur mit Schaltdrossel oder Relais möglich; geringere Überlastbarkeit der Schaltelemente; Spannungsversorgung etwas aufwendiger.

Prozeßsteuerungen findet man in der chemischen Verfahrenstechnik [5], Eisenhüttentechnik und in Energieerzeugungsanlagen [6, 7]. An ausgeführten Anlagen sollen die wesentlichen Merkmale der Prozeßsteuerung in den einzelnen Industriezweigen erläutert werden.

### Taktsteuerungen

Unter diesem Begriff sollen nur solche Steuerungen verstanden werden, bei denen die Weiterschaltung der Takte im wesentlichen von Prozeßzuständen abhängt.

Bild 2 zeigt den Aufbau einer Taktsteuerung (schwarz: Prozeß, Grenzwertmelder  $G$ , Leistungsrelais  $LR$ ; rot: Steuergerät; grün: optische und akustische Überwachung und Rückmeldung). Nach Betätigen der Starttaste werden zunächst alle Taktstufen  $T$  und Kommando- und Rückmeldeeinheiten  $K$  auf die Ausgangsstellung gebracht. Wird nun die Automatiktaste betätigt, so fragt die Taktstufe  $T_1$  die Grenzwertmelder ab (im Beispiel nur  $G_1$ ). Sind die dem Takt zugeordneten Grenzwerte vorhanden, so gibt die Taktstufe Einschaltbefehle an  $K_1$  und

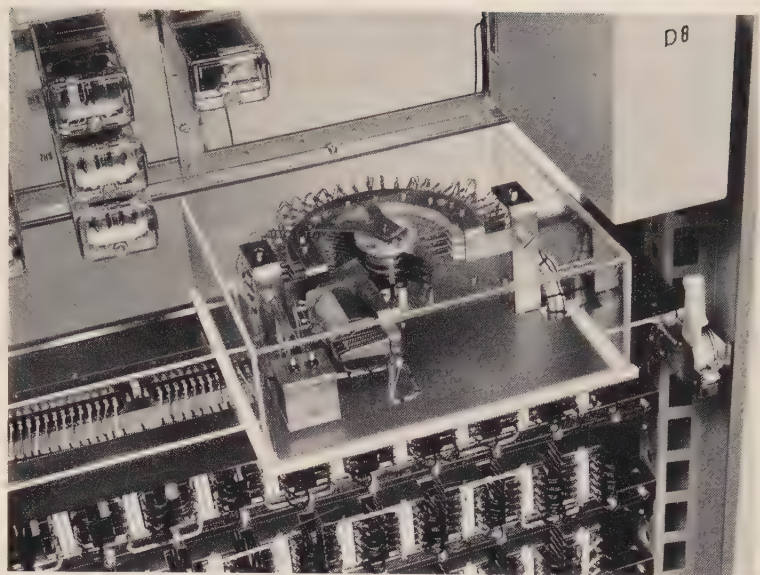


Bild 4 Taktfortschalt-Einheit

$K_2$ , die wiederum über die Leistungsrelais  $LR_1$  und  $LR_2$  Stellglieder im Prozeß betätigen.

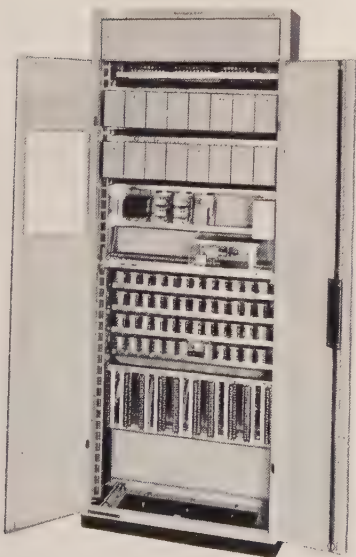
Die Ausführung der Befehle wird überwacht. Die Rückmeldung der Stellgliedstellungen wird nach einer eingestellten Zeit kontrolliert. Fehler werden optisch und akustisch signalisiert oder führen gleich zum Stillstand des Steuerungsablaufes. Das Signalschema für die Stellglieder ist so gewählt, daß man sowohl über die gegenwärtige Stellung (Iststellung) als auch über die geforderte Stellung (Sollstellung) sinnvoll informiert wird.

Auf die Befehle der ersten Taktstufe hin ändern sich die Zustände im Prozeß. Programmgemäß muß dann der Grenzwertmelder  $G_2$  ansprechen. Die Taktstufe  $T_2$  hat im Beispiel neben dem Grenzwertmelder  $G_2$  noch eine Zeitbedingung  $Z_1$  und den Ablauf der Taktstufe  $T_2$  zu berücksichtigen. Liegen alle Meldungen vor, so gibt Taktstufe  $T_2$  Ausschaltbefehl für  $K_1$  und Einschaltbefehl für  $K_2$ . Die weiteren Takte laufen in gleicher Weise ab. Jeder laufende oder abgelaufene Takt wird durch Lampen angezeigt.

Für alle Zeitbedingungen ist bei Transistorsteuerungen eine Zeituhr  $Z_0$  vorgesehen, die von den entsprechenden Taktstufen jeweils auf Null gesetzt wird. Jeder unterschiedlichen Zeitbedingung muß ein Zeiteinsteller zugeordnet werden. In Relaissteuerungen verwendet man für die Zeitbedingungen Zeitrelais.

Mit der Handtaste wird die Steuerung auf Handbetätigung geschaltet. Man kann nun jedes Stellglied beliebig schalten, es sei denn, man verlangt auch hier noch an besonders kritischen Stellen eine Verriegelung. Eine taktweise Fortschaltung oder Wiederholung ist ebenfalls von Hand möglich.

Bild 3 Relais-Taktsteuerung





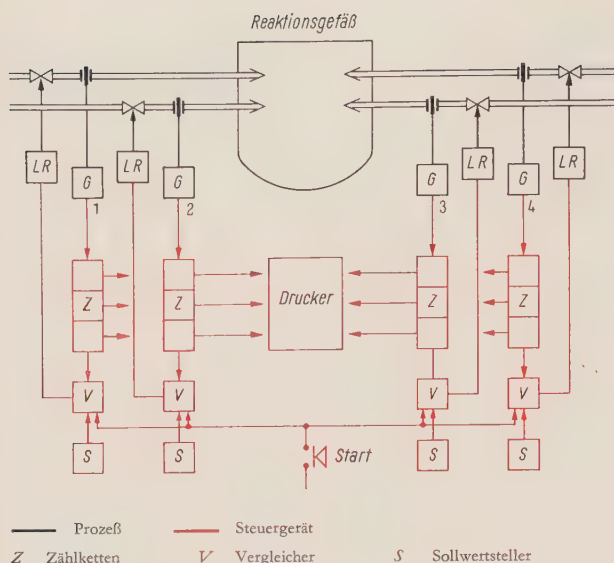


Bild 5 Dosiersteuerung

Bild 3 zeigt eine Relais-Taktsteuerung. Von oben nach unten erkennt man: Sicherungstreifen, Relaisensätze, Taktfortschalt-Einheit, Gleichrichter und Klemmleisten. Ein vergrößerter Ausschnitt der Taktfortschaltung geht aus Bild 4 hervor.

Taktsteuerungen in der beschriebenen Art sind bekannt bei diskontinuierlichen chemischen Verfahren, bei Auf-

bereitungsanlagen für Wasser und bei Anfahrvorgängen von Kraftwerken. Das Prinzip der Taktsteuerungen wird auch in den nachfolgend beschriebenen Steuerungen angewendet.

### Dosiersteuerungen

Unter diesem Begriff sollen alle Dosiersteuerungen verstanden sein, bei denen die zu dosierenden Mengen als mengenabhängige Impulse erfaßt werden.

Bild 5 zeigt die Prinzipschaltung einer Dosiersteuerung. Ein Reaktionsgefäß soll mit vier Einsatzkomponenten gefüllt werden. Nach Betätigen der Starttaste werden über die Leistungsrelais LR die Zulaufventile zum Reaktionsgefäß geöffnet und die Komponenten strömen in das Reaktionsgefäß. Die einzelnen Mengen werden über mengenproportionale Impulse der Signalumformer  $G_1$  bis  $G_4$  erfaßt. Die Zählimpulse werden in den Zählern Z aufgezählt und mit den eingestellten Sollwerten S in den Vergleichern V verglichen. Sobald ein Produkt seinen Sollwert erreicht hat, schließt das zugehörige Zulaufventil. Nachdem alle Produkte eingefüllt worden sind, werden die dosierten Mengen gewöhnlich zur Kontrolle gedruckt.

Ein anderes Verfahren der Mengendosierung beruht darauf, das Produkt Durchfluß mal Zeit zu erfassen. Dabei muß der Durchfluß der verschiedenen Komponenten geregelt werden. Eine Uhr gibt in einen Zähler Zeitimpulse. Wird der Sollwert-Durchfluß konstant gehalten, so ist die eingestellte Einfüllzeit proportional zur Einlaufmenge.

Dosiersteuerungen können Bestandteil einer Taktsteuerung sein. Beispielsweise kann ein bestimmter Takt eine Dosiersteuerung einleiten. Oft ist die Taktsteuerung aber auch nur als Bestandteil der Dosiersteuerung anzusehen, beispielsweise, wenn die Produkte nicht gleichzeitig, sondern nacheinander eingefüllt werden müssen.

Anwendungsgebiete der Dosiersteuerungen in der beschriebenen Form sind im wesentlichen chemische Chargebetriebe.

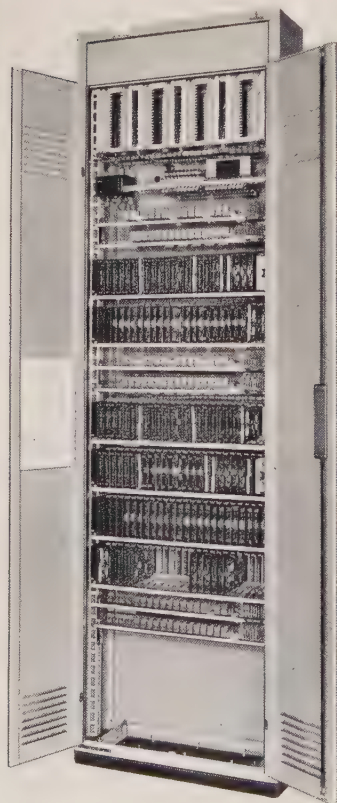
Bild 6 zeigt eine mit Transistoren bestückte Dosiersteuerung. Von oben nach unten erkennt man: Klemmleisten, Sicherungstreifen und abwechselnd Leistungsrelais zum Anschluß an den Drucker sowie Transistoreinschübe.

### Auswahlsteuerungen

Von einer Auswahlsteuerung spricht man, wenn die Einleitung eines Steuervorganges von der Auswahl mehrerer Grenzwerte oder Meßwerte abhängt. Bei Sicherheitssystemen ist beispielsweise die 2-von-3-Auswahl bekannt. In der Regelungstechnik wird die Auswahl eines höchsten oder niedrigsten Meßwertes oft als Istwert verwendet.

Bild 7 zeigt eine digitale Auswahlsteuerung. Es handelt sich um die Umsteuerung von Winderhitzern. Von einer

Bild 6 Transistor-Dosiersteuerung



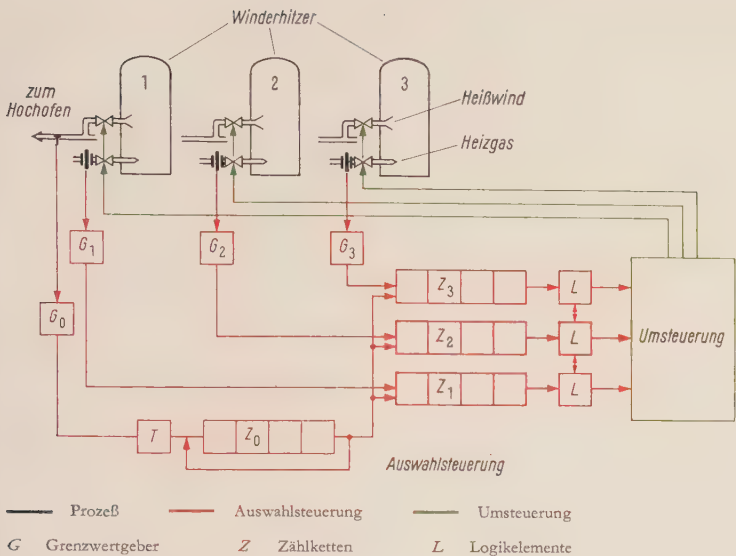


Bild 7 Auswahlsteuerung

Gruppe von Winderhitzern arbeitet jeweils ein Winderhitzer mit Heißwind auf den Hochofen. Die anderen Winderhitzer werden mit Gas aufgeheizt. Hat der arbeitende Winderhitzer sich so weit abgekühlt, daß der Temperatur-Grenzwertgeber  $G_0$  anspricht, so soll er wieder aufgeheizt werden und in richtiger Reihenfolge der nächste Winderhitzer auf den Hochofen geschaltet werden. Die Reihenfolge kann man von der Gasmenge beim Aufheizen ableiten. Dazu werden die einzelnen Gasmengen über Signalumformer  $G_1$  bis  $G_3$  in Impulse umgeformt und diese in Zählern  $Z_1$  bis  $Z_3$  summiert. Erhält die Steuerung über  $G_0$  ein Signal zur Auswahl des nächsten Winderhitzers, so wird mit Hilfe des Taktgebers  $T$  und des Zählers  $Z_0$  in alle Zähler  $Z_1$  bis  $Z_3$  die volle Zählkapazität zu den bestehenden Werten in rascher Folge dazugezählt. Dabei ist zu bemerken, daß ein digitaler Zähler im allgemeinen wieder auf dem ursprünglichen Wert steht, wenn man die volle Zählkapazität da-

zuzählt. (Beispiel: Zählkapazität 1000, Zählerstand 571, nach Einzählen von 1000 Impulsen steht Zähler wieder auf 571.) Weiterhin wird derjenige Zähler von  $Z_1$  bis  $Z_3$  den Endwert seiner Kapazität zuerst erreicht haben, der ursprünglich den größten Wert besaß. Dieser Zähler wird durch die Logikelemente  $L$  ausgewählt und der Umsteuerung gemeldet. Der Zähler selbst wird auf Null gestellt. Die Umsteuerung betätigt darauf die Umsteuerventile, die dem umzusteuern den Winderhitzer zugeordnet sind. Die Umsteuerventile müssen dabei in festgelegter Reihenfolge betätigt werden.

Programmierbare Prozeßsteuerungen

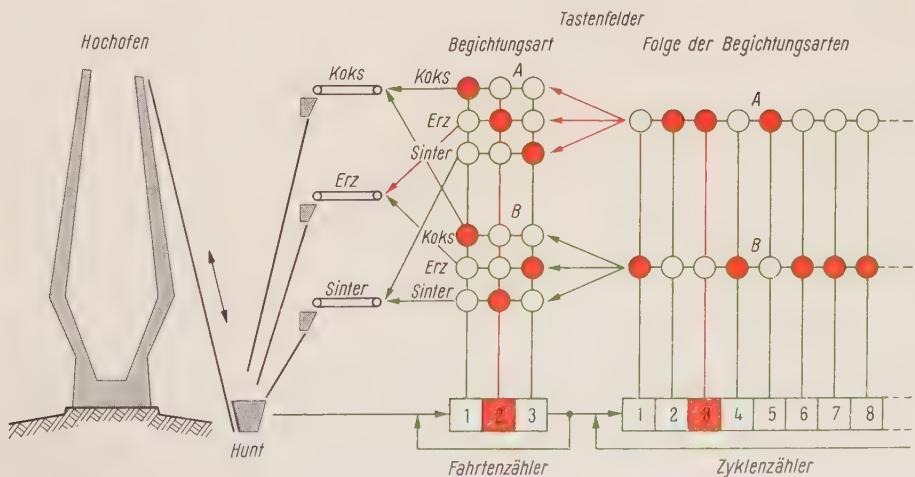
Beim Dosieren, Mischen und Begichten wird oft die Forderung gestellt, verschiedene Produktkombinationen sowie die Reihenfolge der Produkte für viele Chargen im voraus

durch ein Programm festzulegen und den Betrieb dann automatisch ablaufen zu lassen.

In Bild 8 ist die Begichtungssteuerung eines Hochofens herausgegriffen, die für solche Anlagen als kennzeichnend betrachtet werden kann. Ein Hochofen wird unter anderem mit Koks, Erz und Sinter beschickt. Die Fahrt mit dem Hunt geht für jedes Produkt getrennt vor sich. Eine aufeinanderfolgende und zusammengehörende Anzahl von Fahrten sei ein Zyklus. Von einer Begichtungssteuerung wird nun verlangt, daß man durch ein Programm verschiedene Arten von Zyklen wählen kann, und daß man die Folge der Arten für 20 und mehr Zyklen ebenfalls durch ein Programm bestimmen kann. Programmiert wird in diesem Beispiel durch Tastenfelder. Betätigte Tasten sind rot gezeichnet. Es werden zwei Begichtungsarten  $A$  und  $B$  unterschieden. Bei  $A$  ist die Reihenfolge der Fahrten: Koks, Erz, Sinter; bei  $B$  ist die Reihenfolge: Koks, Sinter, Erz. Natürlich können mehr Produkte be-

— Prozeß — Steuergerät — Prozeßzustand

Bild 8 Programmierbare Begichtungssteuerung





teilt sein oder einzelne auch ausgelassen sein. In dem Tastenfeld rechts neben den Begichtungsarten ist die Folge der Arten programmiert. Der erste Zyklus wird nach *B*, der zweite und dritte nach *A*, der vierte wieder nach *A* gefahren usw.

Zum Ablauf der Steuerung wird die Anzahl der Hunt-Fahrten gezählt. Dies geschieht im Fahrtenzähler. Jeder abgeschlossene Zyklus wird im Zyklenzähler gezählt. Der Zyklenzähler bestimmt die Begichtungsart des Zyklus über die programmierten Tasten, der Fahrtenzähler bestimmt das Produkt über die programmierten Tasten. Im Beispiel ist der Zählerstand von Fahrten- und Zykluszähler rot markiert. Die roten Wirkungslinien zeigen dann den Ablauf. Zyklus 3 soll nach Art *A* gefahren werden. Die Fahrt 2 nach Art *A* ist Erz. Somit wird Erz in den Hunt gefüllt und auf den Hochofen gefahren.

Auch in Begichtungssteuerungen findet man die Prinzipien der Taktsteuerung verarbeitet. Die Weiterschaltung von Fahrt zu Fahrt kann als Takt angesehen werden. Das Wesentliche an der Steuerung ist jedoch die Programmierung.

#### Schrifttum

- [1] Kaltenecker, H.: Einiges über Begriffe, Aufgaben, Methoden und Hilfsmittel der Steuertechnik. Regelungstechnik **8** (1960) 73 bis 78
- [2] Clauß, M.: Neue Grenzwertmelder für Signal- und Steuersysteme. Regelungstechnik **9** (1961) 59 bis 62
- [3] Bamberger, K. F.: Neue Bausteine für Steuer- und Regelzwecke. Regelungstechnische Praxis (1961) 12 bis 15
- [4] Kaltenecker, H. und Pirouzan, A.: Ein kontaktloses Prozeß-Signalsystem. ETZ-B **12** (1960) 515 bis 520
- [5] Kosbahn, Th.: Die Steuerung in der Verfahrenstechnik. Regelungstechnik **8** (1960) 79 bis 84
- [6] Decker, A.: Über die Instrumentierung von Leistungsreaktoren. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 264 bis 267
- [7] Duynslaeger, A. und Stockmeyer, W.: Die Automatisierung von Vollentsalzungsanlagen. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 309 bis 312

## Ein Digital-Auswertegerät für Gas-Chromatographen

VON HANS KÜRNER

Die Gas-Chromatographie ist ein physikalisches Meßverfahren zur Analyse von Gasen und Flüssigkeiten. Das Verfahren hat wegen seiner verschiedenen Vorteile, wie geringer apparativer Aufwand, große Schnelligkeit der Analyse und einfache Arbeitsmethode, rasch großes Interesse in Wissenschaft und Technik gefunden.

Über die Grundlagen des Verfahrens und den geräte-technischen Aufbau eines Gas-Chromatographen wurde an anderer Stelle [1, 2, 3] ausführlich berichtet. Es sollen deshalb hier nur die wichtigsten Begriffe wiederholt werden.

Bild 1 zeigt die grundsätzliche Anordnung zur Gas-Chromatographie. Die Hauptteile der Apparatur sind: die Trennsäule, das Dosiersystem, der Detektor und das Registriergerät. In der Trennsäule werden die verschiedenen Gaskomponenten, die gleichzeitig und gemischt eingegeben werden, unterschiedlich verzögert, so daß sie am Säuleneende nacheinander erscheinen. Im Detektor wird die Wärmeleitfähigkeit als charakteristische Gaseigen-

schaft gemessen und der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit zwischen Vergleichs- und Meßgas in proportionale elektrische Spannungen umgeformt. Der Schreiber registriert diese Spannungen in einem »Chromatogramm« (Bild 2). Die Komponenten des analysierten Gases folgen einander in zeitlicher Reihenfolge. Die Abszisse des Chromatogramms ist also ein Maß für die Art der Komponente, die Ordinate ein Maß für ihre Konzentration.

### Auswertung des Chromatogramms

Die wichtigsten Begriffe des Chromatogramms sind in Bild 2 eingezeichnet. Man unterscheidet vor allem die Bandenhöhe und die Bandenfläche. Dabei versteht man unter einer Bande denjenigen Teil des Chromatogramms, der während des Erscheinens einer Komponente entstanden ist.

Chromatogramme können grundsätzlich nach der Höhe oder der Fläche ausgewertet werden [3]. Unter gewissen Voraussetzungen kann zur quantitativen Auswertung mit Vorteil die Bandenhöhe benutzt werden. Bei schlecht aufgelösten Gruppenbanden, wie sie besonders bei komplexen Flüssigkeitsgemischen vorkommen, oder bei stark verzerrten Einzelbanden, die durch die polare Struktur des zu analysierenden Stoffes bedingt sein können, versagt jedoch die Höhenmethode, und die Auswertung muß mit der Flächenmethode vorgenommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß weder die Bandenhöhe

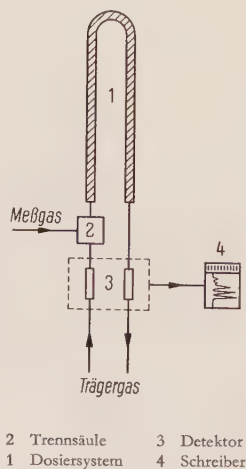


Bild 1 Grundsätzlicher Aufbau eines Gas-Chromatographen

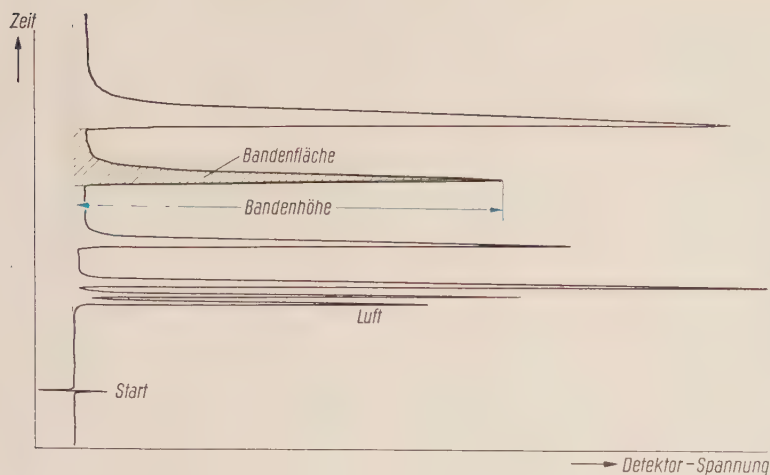


Bild 2 Gas-Chromatogramm. Die wichtigsten Begriffe sind eingezeichnet

noch die Bandenfläche ein absolutes Maß für die Menge der einzelnen Komponenten ist. Beide Werte müssen für jede Gasart mit einem individuellen Eichfaktor multipliziert werden.

### Selbsttätige Auswerteeinrichtung

Der Gas-Chromatograph bringt gegenüber den bisher üblichen Analyseverfahren eine beträchtliche Ersparnis an Zeit und Arbeit. Dennoch bedeutet das manuelle Auswerten der Chromatogramme noch einen Arbeitsaufwand, der stark belastet, wenn zahlreiche Chromato-

gramme anfallen. Überdies kann es stören, daß wegen der Auswertung eine Zeit vergeht zwischen dem eigentlichen Abschluß der Analyse und einem aufgrund des Ergebnisses notwendigen Eingriff in einen Prozeß. Aus diesem Grund wurde im Wernerwerk für Meßtechnik eine Digital-Auswerteeinrichtung entwickelt, die die Analysenergebnisse selbsttätig auswertet.

Bei der Entwicklung des Auswertegerätes standen folgende wesentliche Gesichtspunkte im Vordergrund:

- Das Analysenergebnis ist gleichzeitig mit dem Aufzeichnen des Chromatogramms auszuwerten.
- Die Auswertung ist nach Bandenhöhe und Bandenfläche durchzuführen.
- Das Ergebnis ist in Ziffern anzuzeigen.
- Das Auswertegerät muß aus einzelnen Bausteinen zusammensetzbar sein. Eine Erweiterung der Anlage mit zusätzlichen Bausteinen, z. B. Speichern, oder Ausgabegeräten, z. B. Druckern, muß möglich sein.

Bild 3 zeigt das Prinzip des Digital-Auswertegerätes. Der Kompensationsschreiber zum Aufzeichnen der Ausgangsspannung des Detektors trägt ein Folgepotentiometer. An ihm wird die Meßspannung abgegriffen und mit einem elektronischen Umsetzer in eine streng proportionale Impulsfrequenz umgewandelt. Diese Impulse werden über die Zeit des Auftretens jeder Bande mit einer elektronischen Zählkette summiert. Am Ende jeder Bande wird der Digitalwert auf einen Speicher übernommen und angezeigt. Anfang und Ende jeder Bande sind durch Umkehrpunkte der Spannung gekennzeichnet. Diese relativen Spannungsmaxima oder -minima werden von einem Analog-Digital-Umsetzer und einer Zahlenvergleichsschaltung ermittelt. Die in den Umkehrpunkten auftretenden Banden werden auf einen zweiten Speicher übernommen und ebenfalls angezeigt.

Das Auswertegerät besteht aus folgenden Baugruppen:

- elektronischer Umsetzer von Meßspannung in Impulsfrequenz,
- elektronische Zählketten,
- Analog-Digital-Umsetzer mit Zahlenvergleichsschaltung,
- Speicher, Zahlenanzeiger, Steuerschaltung, Netzteil.

### Technische Ausführung

Das gesamte Auswertegerät ist aus steckbaren Baugruppen aufgebaut und in einem kleinen Schrank untergebracht. Bild 4 zeigt das Auswertegerät zusammen mit dem Universal-Gas-Chromatographen.

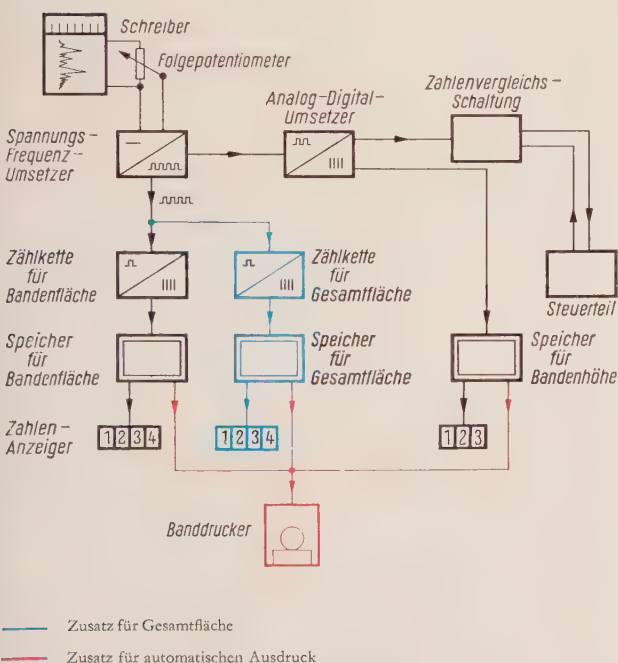


Bild 3 Blockschaltung des Digital-Auswertegerätes





Bild 4 Digital-Auswertegerät für Gas-Chromatographen

Der Spannungs-Frequenz-Umsetzer arbeitet nach dem Prinzip der Sägezahnspannung mit gesteuertem Anstieg. Bild 5 zeigt die Blockschaltung. Die Eingangsspannung erzeugt in einem Integrator eine Sägezahnspannung, deren Anstieg proportional zur angelegten Spannung ist. Diese Ausgangsspannung des Integrators geht auf den Eingang des Amplitudenvergleichers, in dem eine konstante Vergleichsspannung vorgegeben ist. Erreicht die Eingangsspannung diese Vergleichsspannung, so wird ein Impuls erzeugt. Dieser Impuls wird verstärkt zum Integrator zurückgeführt und dadurch dessen Ausgangsspannung auf Null zurückgestellt, so daß der Vorgang erneut beginnen kann. Die so entstehende Impulsfrequenz ist proportional zur Eingangsspannung.

Zählt man die Impulse während der Zeit des Auftretens einer Bande, so erhält man das Zeitintegral der Meßspannung und damit einen Zahlenwert, der der Bandenfläche proportional ist. Als Zählleinrichtung werden elektroni-

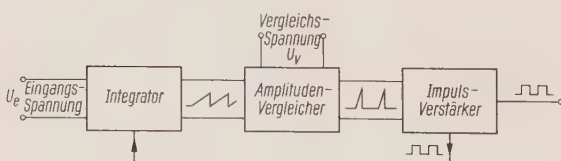


Bild 5 Prinzip des Spannungs-Frequenz-Umsetzers

sche Zählstufen verwendet, die aus einzelnen bistabilen Transistor-Kippstufen aufgebaut und in Kettenschaltung zusammengesetzt sind [4]. Das Zählergebnis steht am Ausgang der Zählkette als Kombination des Schaltzustandes der Kippstufen zur Verfügung.

Am Ende jeder Bande, wenn also die Meßspannung ein relatives Minimum durchläuft, wird der Wert der Zählkette in einen Speicher übernommen und die Zählkette gelöscht. Anschließend beginnt die Zählung der Impulse der neuen Bande.

Um die Bandenhöhe und gleichzeitig die Umkehrpunkte der Meßspannung, also Anfang und Ende jeder Bande, zu ermitteln, ist ein Analog-Digital-Umsetzer [4, 5] eingebaut. In Zeitabständen von 50 ms wird der Momentanwert der Meßspannung digital gemessen und mit dem vorhergehenden Momentanwert verglichen. Eine Zahlenvergleichsschaltung stellt fest, ob der neue Wert größer, gleich oder kleiner ist als der letzte Wert. Von dieser Entscheidung werden Steuerimpulse abgeleitet. Beim Auftreten eines Minimums werden der Momentanwert (entsprechend dem Nullpunkt) und der Integralwert jeweils auf einen Speicher übernommen. Gleichzeitig wird die Zahlenvergleichsschaltung so eingestellt, daß das Auftreten eines Maximums geprüft wird. Durchläuft die Meßspannung das nächste Maximum, so wird der Momentanwert (entsprechend der Bandenhöhe) auf den zugehörigen Speicher übernommen und gleichzeitig die Zahlenvergleichsschaltung auf das Prüfen eines Minimums umgeschaltet.

Nach der Speicherübernahme werden die Digitalwerte als Zahlen angezeigt.

Anfang und Ende einer Analyse werden von Hand eingetastet. Der ganze übrige Vorgang der Auswertung läuft selbsttätig ab.

Die Genauigkeit der Auswertung beträgt 1 %.

### Erweiterungsmöglichkeiten

Das Auswertegerät in seiner Grundausführung bedeutet einen wesentlichen Fortschritt für die Gas-Chromatographie. Der Aufbau der Einrichtung aus einzelnen Bausteinen erweitert darüber hinaus die Auswertmöglichkeiten und damit den Anwendungsbereich.

Einige der zahlreichen Ausbaumöglichkeiten sind im folgenden beschrieben:

#### Ausdrucken der Ergebnisse

Beim Grundgerät müssen die Analysenergebnisse von den Zahlenanzeigern abgelesen und aufgeschrieben werden. Diese Tätigkeit kann automatisiert werden durch den Anschluß eines Druckers, der die Bandenhöhen in den Umkehrpunkten und die Bandenflächen der Reihe nach auf einen schmalen Papierstreifen ausdruckt. Bild 6 zeigt einen solchen Ergebnistreifen, Bild 4 den dafür verwendeten Banddrucker.

0001		002
0001	084	
0001	1321	
0002		004
0002	071	
0002	0761	
0003		004
0003	075	
0003	0684	
0004		004
0004	038	
0004	0276	
0005		005
0005	091	
0005	1548	
0006	4590	

Bild 6 Ergebnisstreifen mit ausgedruckten Analysenwerten des Gas-Chromatographen

Der Drucker wird elektronisch angesteuert, die Zeit für einen Druckvorgang beträgt etwa 0,3 s.

### Integration über die Gesamtfläche aller Banden

Wenn als Ergebnis der Analyse der prozentuale Anteil der verschiedenen Komponenten gesucht und eine Absolut-Eichung der einzelnen Komponenten wegen nicht reproduzierbarer Probeneingabe (Flüssigkeiten) nicht möglich ist, so muß der Flächeninhalt jeder Bande ins Verhältnis gesetzt werden zu der Gesamtfläche aller Banden. Für diesen Fall kann das Auswertegerät durch eine zusätzliche Zählkette mit Speicher und Zahlenanzeiger erweitert werden. Der Wert für die Gesamtfläche kann ebenfalls mit dem Banddrucker am Ende der Analyse ausgedruckt werden. Um den Gesamtwert von den Einzelwerten unterscheiden zu können, wird er zweckmäßigerweise in anderer Farbe ausgedruckt.

### Automatische Berücksichtigung der Eichfaktoren

Wie bereits erwähnt, müssen sowohl die Werte der Bandenhöhe als auch diejenigen der Bandenfläche mit spezifischen Eichfaktoren korrigiert werden, damit man die Konzentration der betreffenden Komponente erhält. Die

verschiedenen Eichfaktoren müssen mit der reinen Substanz oder mit einem der Probe ähnlich zusammengesetzten Eichgemisch bei den vorliegenden Analysenbedingungen ermittelt werden. Damit die notwendige Korrektur selbsttätig ausgeführt wird, kann das Auswertegerät mit einer Zusatzeinrichtung (Bild 7) ausgerüstet werden, die aus einer Anzahl von Zahleneinstellern für die Eichfaktoren und einem Wähler besteht. Der Wähler wird von der Steuereinrichtung bei Beginn jeder Bande um einen Schritt weitergeschaltet. Die Schaltung ist so aufgebaut, daß jeder Meßwert mit dem zugehörigen Faktor multipliziert wird. Auf den Zahlenanzeigern und dem Druckprotokoll erscheint dadurch ein Zahlenwert, der der Konzentration der betreffenden Komponente entspricht.

### Speicherung der Zahlenwerte zur Weiterverarbeitung

Der Gas-Chromatograph wird nicht nur für Analysen im Laboratorium verwendet. In vielen Fällen werden die Geräte eingesetzt, um die laufende Produktion zu überwachen. Die Analysenergebnisse können in diesem Fall in digitaler Form gespeichert werden, um eine automatische Weiterverarbeitung [5] möglich zu machen. Das Auswertegerät wird zu diesem Zweck mit einer Anzahl zusätzlicher kleiner Speichereinheiten erweitert. Über einen Wähler, der von der Steuerschaltung betätigt wird, übernehmen diese Speicher zyklisch den jeweiligen Zahlenwert der betreffenden Bande.

Diese Speicherwerte können z. B. digital ständig angezeigt oder mit Hilfe von Digital-Analog-Umsetzern und -Schreibern analog geschrieben werden, um sowohl Augenblickswerte als auch Zeitverhalten der betreffenden Komponenten darzustellen. Die erwähnte Methode der Speicherung von Analysewerten ist immer dann notwendig, wenn diese Größen Eingangswerte von Meßwertverarbeitungsanlagen und Regelkreisen sind. Mit den Mitteln der selbsttätigen Meßwertverarbeitung können dann die Analysenwerte z. B. auf Einhaltung vorgegebener Grenzen überwacht oder aus ihnen sogenannte »Führungszahlen« [6, 7] berechnet werden, mit deren Hilfe die notwendigen Eingriffe in die Prozesse vorgenommen werden können.

Diese Möglichkeiten werden in den kommenden Jahren für die Optimierung von Prozessen der Verfahrenstechnik zunehmende Bedeutung gewinnen.

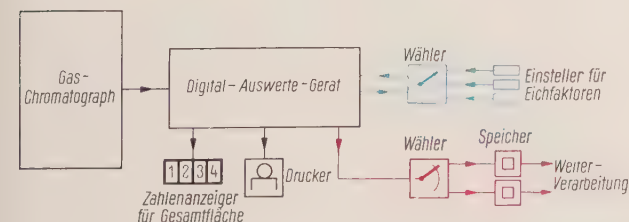


Bild 7 Erweiterung des Auswertegerätes zur automatischen Berücksichtigung der Eichfaktoren (blau) und zur Speicherung der Analysenergebnisse (rot)

### Schrifttum

- [1] Oster, H.: Ein Präzisions-Gas-Chromatograph für das Betriebslaboratorium. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 137 bis 144
- [2] Naumann, A.: Was ist Gas-Chromatographie? ATM (1959) R 69 bis R 72
- [3] Scharfe, G.: Zur Methodik der Analyse kohlenwasserstoffhaltiger Gase durch Gas-Chromatographie. Erdöl und Kohle 12 (1959) 723 bis 728
- [4] Schneider, H.: Digitale Meßtechnik. Elektronik 7 (1958) 201 bis 212
- [5] Kürner, H.: Digitale Meßmethoden als Grundlage der selbsttätigen Meßwert-Verarbeitung. Automatik 5 (1960) 362 bis 370
- [6] Kürner, H. und Weber, E.: Einige Aufgaben der Meßwert-Verarbeitung. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 220 bis 223
- [7] Weber, E.: Datenreduzierung durch Meßwert-Verarbeitung. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 690 bis 693



## Impulshöhenanalyse und $\gamma$ -Spektroskopie

VON FRIEDRICH H. RINN

Der klassischen Spektroskopie liegt die Entdeckung von BUNSEN zugrunde, daß alle Elemente in selbstleuchtendem Zustand Licht einer oder mehrerer genau definierter Wellenlängen, also ein charakteristisches Linienspektrum, aussenden. Die Ausnutzung dieser Eigenschaft führte zu neuen wichtigen Erkenntnissen (Entdeckung unbekannter Elemente, Identifizierung bestimmter Elemente in den äußeren Sonnenschichten u. a. m.). Auf ähnliche Verhältnisse stößt man bei den radioaktiven Elementen; hier gilt die dem Gesetz von BUNSEN äquivalente Aussage, daß alle  $\gamma$ -strahlenden Elemente Strahlen einer oder mehrerer genau definierter Wellenlängen, also eine oder mehrere Quantengruppen genau definierter Energie, die für das betrachtete Element charakteristisch sind, emittieren. Sowohl diese Erkenntnis als auch die Entwicklung von Detektoren, die es ermöglichen, neben der Intensität auch die Energie einer  $\gamma$ -Strahlung zu messen, legen es nahe, die optische Spektralanalyse in das Gebiet der  $\gamma$ -Strahlen auszudehnen, sie also zur Identifizierung einzelner  $\gamma$ -strahlender Isotope innerhalb eines Elementengemisches heranzuziehen. Da Proportionalzählrohre nur im Gebiet der sehr weichen  $\gamma$ -Strahlung für eine Spektroskopie geeignet sind, blieb die  $\gamma$ -Spektroskopie zunächst auf dieses Gebiet beschränkt. Erst die Entwicklung des Szintillationszählers mit seiner exakten Energieproportionalität und weit größeren Ansprechempfindlichkeit auch für mittelharte und harte  $\gamma$ -Strahlen ermöglichte die Ausdehnung der  $\gamma$ -Spektroskopie bis in das Gebiet kürzester Wellenlängen.

### Szintillationszähler

Ein Szintillationszähler besteht im Prinzip aus einem durchsichtigen Szintillator, der auf das Fenster eines Fotovervielfachers aufgesetzt ist, sowie einer Kathodenfolgerstufe; diese drei Teile bilden eine Baueinheit und sind zusammen mit den erforderlichen Bauelementen in ein lichtdichtes, im allgemeinen zylindrisches Rohrgehäuse eingebaut (Bild 1). Ein nachgeschaltetes System elektronischer Baueinheiten übernimmt die Verstärkung und Registrierung der Impulse sowie die Analyse der Impulshöhenverteilung.

Als Szintillatormaterial für  $\gamma$ -Messungen haben sich Einkristalle aus mit Thallium aktiviertem Natriumjodid besonders eingeführt. Die auf den Kristall auftreffenden  $\gamma$ -Quanten werden in ihm mehr oder weniger voll-

ständig absorbiert; dabei wird die Energie jedes einzelnen Quantes jeweils in einen Lichtblitz, also in eine bestimmte Anzahl von Lichtquanten umgesetzt. Von den erzeugten Lichtquanten fällt ein bestimmter Anteil, der von den Absorptionseigenschaften des Kristalls und dem optischen Kontakt zwischen Szintillator und Fotokathode des Multipliers abhängt, durch das in der Regel flache, durchsichtige Fenster des Multipliers auf dessen erste Elektrode; da diese als Fotokathode ausgebildet ist, löst jeder Lichtblitz, der sie trifft, eine oder mehrere Elektronen los. Dieser geringe Elektronenstrom wird durch Sekundäremission auf mehr als das Millionenfache verstärkt. Selbst Lichtblitze, die aus der Fotokathode nur ein einziges Elektron freimachen, sind auf diese Art noch nachweisbar. Der am Arbeitswiderstand des Fotovervielfachers erzeugte meßbare Spannungsimpuls wird über eine als Impedanzwandler wirkende Kathodenfolgerstufe, die die Anpassung der hochohmigen Fotomultiplierschaltung an das niederohmige Verbindungskabel übernimmt, dem nachfolgenden Impulsverstärker zugeführt.

Einer Anzahl günstiger Eigenschaften wegen ist der Szintillationszähler praktisch zum wichtigsten Detektor der Strahlungsmeßtechnik geworden. Bei Szintillationszählern mit NaJ(Tl)-Kristallen ist die Impulshöhe am Ausgang der Energie der einfallenden Strahlung genau proportional; denn es läßt sich nachweisen, daß einerseits die Anzahl der erzeugten Lichtquanten im Szintil-



Bild 1 Szintillationszähler 1,5''

lator der Energie der einfallenden  $\gamma$ -Quanten und andererseits die Anzahl der von der Fotokathode emittierten Elektronen der Anzahl der auftreffenden Lichtquanten proportional ist. Mit einem Szintillationszähler kann man also über die Impulszahl die Quantenzahl und über die Impulshöhe nach einer Impulshöhenanalyse die Quantenenergie bestimmen. Wegen der kurzen Abklingzeit der Lichtimpulse des Szintillators übertrifft ein Szintillationszähler auch hinsichtlich des zeitlichen Auflösungsvermögens und damit der Zählgeschwindigkeit alle anderen Strahlungsdetektoren. Seine größte Stärke aber ist seine hohe Ansprechempfindlichkeit für  $\gamma$ -Quanten. Da die Wahrscheinlichkeit einer  $\gamma$ -Absorption mit zunehmender Dichte des absorbierenden Stoffes ansteigt, muß die Ansprechwahrscheinlichkeit eines Szintillationszählers, bei dem die Absorption in der verhältnismäßig dichten Szintillatorsubstanz stattfindet, zwangsläufig recht groß sein; zudem lassen sich verhältnismäßig große, gut durchsichtige Kristalle herstellen, in denen die  $\gamma$ -Strahlung fast vollständig absorbiert wird, so daß man Ansprechwahrscheinlichkeiten von nahezu 100% erzielen kann. Diese Eigenschaft im Verein mit der Energieproportionalität macht den Szintillationszähler zu einem Detektor, der zur Aufnahme des Energiespektrums einer  $\gamma$ -Strahlung ausgezeichnet geeignet ist.

Allerdings muß auch auf einen wesentlichen Nachteil, obwohl er zu beherrschen ist, in diesem Zusammenhang hingewiesen werden. Eine Konstanz des Multiplizitätsfaktors ist nicht mehr gewährleistet, wenn sich die Umgebungstemperatur stark ändert oder wenn der Multiplierstrom zu hoch wird, die eingestrahlte Quantenzahl also zu groß ist. Die Temperaturabhängigkeit der Verstärkung ist bei verschiedenen Bauformen verschieden groß, sie schwankt sogar von Exemplar zu Exemplar innerhalb einer Bauform und kann bis zu einigen Prozent je Grad Temperaturänderung betragen. Verstärkungsänderungen bei zu hoher Belastung des Multipliers, die sogenannten Ermüdungserscheinungen, treten in den meisten Fällen dann auf, wenn der Strom im Vervielfacher über eine gewisse Zeit etwa  $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  übersteigt; die Amplitudenänderungen am Ausgang können 1 bis 2%, bei starker Belastung aber auch 100% und mehr je Stunde betragen. Bei Aufnahmen von  $\gamma$ -Spektren ist es also empfehlenswert, die Raumtemperatur möglichst gut konstant zu halten und bei Präparaten mit energiereicher Strahlung die Präparatstärke  $10\mu\text{C}$  nicht zu überschreiten.

### Hochspannungserzeuger und Linearverstärker

Die für den Fotovervielfacher des Szintillationszählers benötigte Hochspannung liegt bei etwa 1kV. An die Konstanz dieser Spannung werden hohe Ansprüche gestellt, da nur durch höchste Spannungskonstanz Proportionalität zwischen der Energie der einfallenden Quanten und der Impulshöhe am Detektorausgang gewährleistet ist. Dabei ist die genaue Kenntnis der absoluten Größe

der Hochspannung von untergeordneter Bedeutung, da sie als Speisespannung den jeweiligen Betriebsbedingungen angepaßt werden muß; entscheidend ist aber eine saubere Reproduzierbarkeit. Daneben ist noch besonders auf Belastungsunabhängigkeit der Hochspannung Wert zu legen, da der Multiplierstrom je nach Intensität und Energie der zu erfassenden Strahlung gewissen Schwankungen unterworfen ist.

Bild 2 zeigt das Ausführungsbeispiel eines Hochspannungserzeugers mit einem Spannungsbereich von 250 V bis 5 kV, der mit einem HF-Oszillator arbeitet und auch für den Anschluß anderer Detektoren mit höherer Betriebsspannung gedacht ist. Die Ausgangsspannung, deren Polarität umkehrbar ist, kann in Grob-, Mittel- und Feinstufen geregelt werden. Die Schwankungen der Hochspannung bei Netzspannungsschwankungen von  $\pm 10\%$  bleiben kleiner als 0,02%, während die Spannungsdrift über 12 Stunden in etwa gleicher Größe liegt, wenn für konstante Raumtemperatur gesorgt ist.

Da die Amplitude der vom Szintillationszähler gelieferten Impulse für eine Impulshöhenanalyse nicht ausreichend ist, muß ein Impulsverstärker zwischengeschaltet werden. Bedenkt man, daß die Quanten bei hohen Strahlungsintensitäten sehr dicht aufeinanderfolgen, daß nur dann Verfälschungen des Impulsspektrogramms vermieden werden, wenn die Impulse beim Durchlaufen des Verstärkers ungeändert bleiben und daß Amplitudenunterschiede im Verhältnis 1 : 1000 (Energiebereich 5 keV bis 5 MeV) auftreten können, so sind die an einen Verstärker dieser Art zu stellenden Anforderungen sofort erkennbar: Er muß einen ausreichenden Verstärkungsfaktor haben, ein günstiges zeitliches Auflösungsvermögen und eine ausreichende Bandbreite aufweisen und eine gute Proportionalität über etwa zwei Dekaden mit einer hinreichenden zeitlichen Konstanz der Verstärkung gewährleisten; außerdem muß er übersteuerungsfest sein und darf keine Basislinienverschiebung zulassen.

Bild 3 zeigt einen Linearverstärker, der die erwähnten Forderungen hinreichend erfüllt. Der Gesamtverstärkungsfaktor, der durch einen Abschwächer stufenweise

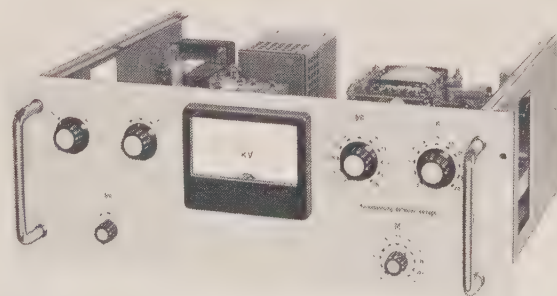


Bild 2 Hochspannungserzeuger für 5 kV



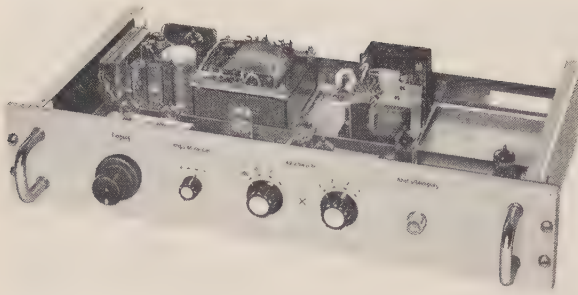


Bild 3 Impuls-Linearverstärker

unterteilt werden kann, beträgt  $10^4$ ; seine Bandbreite liegt bei etwa 1 MHz, die Impulsbreite ist auf  $1,5\mu\text{s}$  eingestellt. Daneben ist die Eingangsamplitude zwischen positiv und negativ wählbar und Anschlußmöglichkeit für einen Oszillographen vorhanden.

### Impulshöhenanalysator

Zur Aufnahme des Energiespektrums einer  $\gamma$ -Strahlung ist nach den bisherigen Darlegungen eine Amplitudenanalyse der vom Strahlungsdetektor gelieferten Impulse notwendig. Im einfachsten Fall kann hierzu ein sogenannter Integral- oder Schwellendiskriminator benutzt werden. Seine einfachste Form ist eine vorgespannte Diode in Reihe mit dem Eingangsimpuls; die veränderbare Vorspannung definiert die Schwelle. Häufiger verwendet wird der sogenannte Schmitt-Trigger; seine einstellbare Kippspannung definiert die Schwelle. Jeder Eingangsimpuls, der die Schwelle übersteigt, liefert am Ausgang im Idealfall einen Rechteckimpuls konstanter Höhe. Wird die Schwelle schrittweise verschoben, so kann man mit einem solchen Diskriminator eine integrale Amplitudenkurve aufnehmen; durch graphische Differenzierung ergibt sich daraus die differentielle Amplitudenkurve  $I = f(U_A)$ . Eine vorherige Eichung mit einem Testpräparat legt die Beziehung  $E = \text{konst.} \cdot U_A$  fest, so daß die gewonnene Amplitudenverteilung direkt die Energieverteilung des  $\gamma$ -Strahlers enthält.

Dieses Verfahren ist etwas mühsam und zeitraubend; günstiger ist es, die differentielle Amplitudenkurve direkt aufzunehmen. Dazu gibt man alle ankommenden Impulse gleichzeitig in zwei parallelgeschaltete Schwellendiskriminatoren, deren Schwellen auf die Impulshöhen  $U$  (Zähldiskriminator) und  $U + \Delta U$  (Sperrdiskriminator) eingestellt sind. Der Zähldiskriminator läßt alle Impulse mit Amplituden größer  $U$  durch, der Sperrdiskriminator alle solche mit Amplituden größer  $U + \Delta U$ . Liegt ein Impuls im Intervall  $\Delta U$ , so registriert also nur der Zähldiskriminator einen Impuls, der nach gewissen Umformungen als Einheitsimpuls am Ausgang erscheint. Ist die Impulsamplitude kleiner als  $U$ , so erscheint am Ausgang kein Impuls, weil beide Diskriminatoren sperren;

übersteigt der Eingangsimpuls aber die Schwelle bei  $U + \Delta U$ , so liefern beide Diskriminatoren einen Impuls; eine nachgeschaltete Antikoinzidenzstufe unterdrückt beide Impulse, so daß am Ausgang auch in diesem Fall kein Impuls erscheint. Ein Ausgangsimpuls wird also tatsächlich nur dann registriert, wenn die Impulshöhe des Eingangsimpulses im Impulshöhenintervall  $\Delta U$  liegt. Der von den beiden Schwellen bestimmte Kanal kann entweder schrittweise oder kontinuierlich über einen vorgegebenen Impulshöhenbereich verschoben werden; alle auszuwertenden Amplituden werden also nacheinander abgetastet. In der Regel wählt man einen Impulshöhenbereich von 0 bis 100 V, da man durch geeignete Wahl der Verstärkung im Linearverstärker immer dafür sorgen kann, daß die interessierenden Impulshöhen in diesen Bereich fallen.

Bild 4 zeigt einen Differentialdiskriminator in Einschubbauweise, der wahlweise als Integral- oder Differentialdiskriminator betrieben werden kann. Als Differentialdiskriminator ist seine Kanalbreite zwischen 0,3 und 30 V mit Hilfe eines Präzisionspotentiometers beliebig wählbar; die Basis des Kanals kann mit Hilfe eines Präzisions-Zehnwindingpotentiometers von Hand oder motorisch über einen Impulshöhenbereich von 5 bis 105 V verschoben werden. Bei Motorbetrieb sind Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 5 V/min einstellbar, und an den Intervallgrenzen kann wahlweise um- oder abgeschaltet werden. Daneben ist als weitere Betriebsart ein schrittweiser Vorschub des Kanals in Schritten zwischen 1 und 5 V möglich. Zusätzlich kann der zu erfassende Impulshöhenbereich dadurch eingengt werden, daß die Lage der unteren und oberen Bereichsgrenze in Abständen von 5 V beliebig vorwählbar ist.

Die bisher beschriebenen Baueinheiten können mit Einheiten, die es ermöglichen, die jeweils anfallenden Impulszahlen zu registrieren, zu einem sogenannten Einkanal-Impulshöhenanalysator kombiniert werden. Zur Registrierung der Impulszahlen wird bei Diskriminatoren mit kontinuierlicher Kanalverschiebung ein Mittelwertmesser benutzt, in dem mit Hilfe eines Integriergliedes eine der Impulshäufigkeit proportionale Gleichspannung erzeugt wird. Die Ausgangsspannung führt man einem Schreiber zu, so daß die Impulshäufigkeit als Linienzug auf dem Papierstreifen des Schreibers erscheint. Die

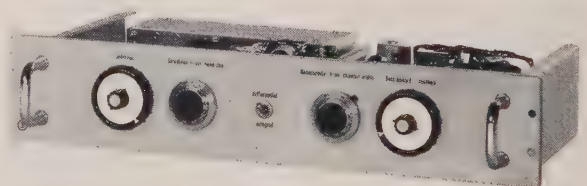


Bild 4 Differentialdiskriminator mit Motorantrieb

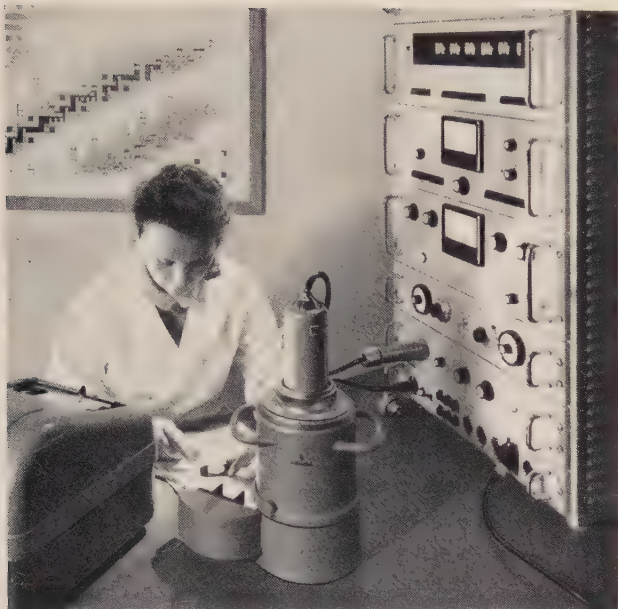


Bild 5 Meßplatz für automatische Impulshöhenanalyse

Geschwindigkeit der Kanalverschiebung und des Papiervorschubes am Schreiber sind zwangssynchronisiert, damit man das Energiespektrum als graphische Darstellung erhält. Bei Kanalverstellung in Stufen, sei es von Hand oder auch motorisch, verwendet man die Kombination eines Impulszählers mit einer elektronischen Uhr; die Anzahl der zu registrierenden Impulse wird bei konstanter Kanallage während einer fest vorgegebenen, an der Uhr vorwählbaren Zeit ausgezählt und mit der Meßzeit zusammen von einem angeschlossenen Zählbetrag-Zeitdrucker ausgedruckt (Bild 5). Bei diesem Verfahren, das eine höhere Genauigkeit gewährleistet, wird das Spektrum also numerisch aufgenommen. Auch mit einer solchen Kombination läßt sich eine automatische Aufnahme des Spektrums machen, wenn dafür gesorgt ist, daß der Drucker am Ende des Druckvorganges durch Signalgabe die Verstellung des Kanals in die nächste Stufe veranlaßt, der Diskriminator nach beendeter Kanalverschiebung die Zählung einleitet und nach Beendigung des Zählvorganges ein Signal den Ausdruck von Zählbetrag und Zeit einleitet. Das Ende des Zählvorganges kann dabei durch Impuls- oder Zeitvorwahl festgelegt werden. Die Impulsvorwahl ist allgemein zu bevorzugen, da in diesem Fall jedes Meßergebnis den gleichen statistischen Fehler aufweist. Um unnötig lange Meßzeiten zu vermeiden, was besonders bei schwachen Präparaten wichtig erscheint, kann durch zusätzliche Zeitvorwahl eine Begrenzung der Meßzeit erreicht werden, da der Zählvorgang von der zuerst erreichten Vorwahlgröße abgeschaltet wird.

### Impulsspektroskop

Die Aufnahme eines  $\gamma$ -Spektrums mit einem Einkanal-Impulshöhenanalysator erfordert einen gewissen Zeit-

aufwand, da die Geschwindigkeit der kontinuierlichen Kanalverschiebung mit Rücksicht auf einen tragbaren statistischen Fehler nicht beliebig groß oder die Verweilzeit des Kanals in einer Stufe bei stufenweiser Verstellung aus den gleichen Gründen nicht beliebig klein gemacht werden kann. Wird nur eine möglichst rasche Orientierung über die Energieverteilung eines  $\gamma$ -Strahlers gewünscht, ohne daß genaue Aussagen über die Intensitätsverteilung erforderlich sind, so ist ein Impulsspektroskop zu bevorzugen. Bei einem solchen Gerät werden die im Linearverstärker verstärkten Impulse zunächst einem Impulsverlängerer zugeführt, der jedem Impuls in der Höhe seines Maximums ein horizontales Dach von etwa  $10 \mu\text{s}$  Dauer anhängt. Diese Impulse werden dergestalt einem Elektronenstrahl-Oszillographen zugeführt, daß die x-Ablenkung proportional der Impulshöhe ist; infolge der Impulsverlängerung ist die x-Ablenkung für die Dauer der gleichzeitig vom Impuls ausgelösten linearen Zeitablenkung und Hellsteuerung konstant. Da durch geeignete Maßnahmen erreicht werden kann, daß die Flanken der Impulse nicht mehr auf dem Schirm erscheinen, besteht das Bild aus parallelen Linien, die den ganzen Schirm überdecken. Dabei werden die einzelnen Linien um so lichtstärker hervortreten, je öfter sie in der Zeiteinheit vom Elektronenstrahl durchlaufen, je mehr Impulse entsprechender Amplitude also in der Zeiteinheit dem Oszillographen zugeführt werden. Setzt man vor den Oszillographenschirm einen Graukeil, dessen Lichtschwächung längs der Linien eine lineare Funktion der Ortskoordinate ist, so erhält man das Spektrogramm als Kurve gleicher Helligkeit. Bei starken Präparaten kann das Spektrogramm unmittelbar mit dem Auge betrachtet werden; bei kleineren Aktivitäten muß man das Bild mit Belichtungszeiten von einigen Sekunden bis einigen Minuten fotografieren, um die statistischen Schwankungen der Strahlung hinreichend auszumitteln. Es ist aber zu beachten, daß die Verwendung eines Graukeils, bei dem die Lichtschwächung längs einer Linie linear verläuft, eine logarithmische Intensitätsskala bedingt. Der Untergrund wie auch das nichtinteressierende Comptonkontinuum werden in dieser Darstellung relativ zur Höhe der Intensitätsmaxima angehoben, so daß sich eine gegenüber den gewohnten Spektrogrammen stark verzeichnete Darstellung ergibt. Dieser Nachteil läßt sich aber vermeiden, wenn man die lineare Zeitablenkung, wie sie in normalen Oszillographen Verwendung findet, durch eine exponentielle Ablenkung unter Beibehaltung konstanter Hellsteuerung ersetzt und auf die Verwendung eines Graukeils gänzlich verzichtet. Die Helligkeitsverteilung innerhalb einer Linie ist dann eine lineare Funktion der Ortskoordinate.

Ein solches Impulsspektroskop kann also, da es die Gesamtheit der vom Detektor gelieferten Impulse gleichzeitig auswertet, das Spektrogramm eines  $\gamma$ -Strahlers sofort liefern; dabei wird die Lage der Intensitätsmaxima recht genau wiedergegeben, während allerdings die Höhe



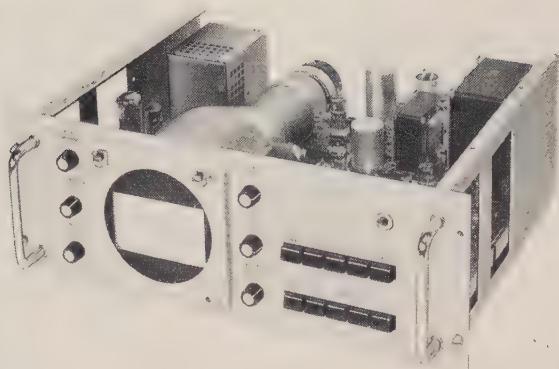


Bild 6 Impulsspektroskop mit exponentieller Zeitablenkung

dieser Maxima wegen der statistischen Schwankungen nur annähernd richtig dargestellt wird.

Ein Impulsspektroskop der beschriebenen Art zeigt Bild 6. Die Zeitablenkung kann hier sowohl exponentiell als auch linear gewählt werden, so daß die Verwendung ohne und mit Graukeil möglich ist. Daneben kann bei Betrieb zusammen mit einem Einkanal-Impulshöhenanalysator die jeweilige Lage und Breite des Diskriminatorkanals in das Schirmbild eingeblendet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die vom Verstärker gelieferten Impulse auch ohne Impulsverlängerung auf dem Schirm sichtbar zu machen, so daß auch die Aufnahme von Stever-Diagrammen zur Bestimmung von Tot- und Erholungszeiten von Zählrohren möglich ist.

### $\gamma$ -Spektren und ihre Deutung

Betrachtet man aufmerksam die Aufnahme eines Co 60-Spektrums (Bild 7), so zeigt diese zwei zunächst nicht zu erwartende Besonderheiten: Einmal sind nicht zwei Linien, die den ausgesandten Quanten mit den Energien 1,17 und 1,33 MeV entsprechen, sondern deren fünf mit einem Kontinuum vorhanden, zum anderen treten keine scharfen Linien, sondern nur mehr oder weniger ausgeprägte Intensitätsmaxima auf. Zur Klärung dieses Sachverhaltes sei daran erinnert, daß die Bildung von Lichtquanten im Kristall des Szintillationszählers durch Elektronen, die bei der Wechselwirkung der  $\gamma$ -Quanten mit dem Leuchtstoff auftreten, ausgelöst wird. Bekannterweise sind drei derartige Wechselwirkungsprozesse – Fotoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildungseffekt – möglich. Beim Fotoeffekt, der bei  $\gamma$ -Energien unterhalb 0,3 MeV praktisch vorherrscht, wird die gesamte Primärenergie auf ein kernnahes Elektron übertragen; ein Teil der Energie wird zu seiner Ablösung verbraucht, der Rest zu seiner Beschleunigung. Die Fotoelektronen haben also alle gleiche Energie und liefern Impulse genau gleicher Größe; es ist demzufolge im Spektrogramm jeweils für Quanten gleicher Energie eine ziemlich scharfe

Linie, die der Totalenergie entspricht, zu erwarten. Demgegenüber geben beim Comptoneffekt, der im Energiebereich 0,3 bis 3 MeV vorherrschend ist, die  $\gamma$ -Quanten nur einen Teil ihrer Energie an das absorbierende Medium ab; die Comptonelektronen erhalten also nur einen, vom Emissionswinkel zum einfallenden  $\gamma$ -Quant abhängigen Teil der  $\gamma$ -Energie, so daß die durch den Comptoneffekt erzeugten Elektronen eine sehr breite kontinuierliche Energieverteilung haben. Die mit verminderter Energie weiterfliegenden  $\gamma$ -Quanten können weitere Comptonprozesse auslösen und, wenn ihre Energie klein genug geworden ist, auch den Fotoeffekt; das ist aber nur dann möglich, wenn der Kristall hinreichend groß ist. Wegen des zeitlich schnellen Aufeinanderfolgens der Einzelprozesse entsteht dann am Ausgang des Multipliers ein Impuls, dessen Höhe gleich der Höhe des Fotoimpulses ist. Verläßt aber das  $\gamma$ -Quant nach ein- oder mehrmaligem Stoß den Kristall, dann ergibt sich ein wesentlich kleinerer Ausgangsimpuls. Für die Comptonprozesse besteht demzufolge keine feste Beziehung zwischen der Energie des einfallenden  $\gamma$ -Quantes und der Höhe des Ausgangsimpulses. Man erhält also im Spektrogramm das sogenannte Comptonkontinuum mit einer scharfen oberen Grenze, der sogenannten Comptonkante, die dem Maximum der Energieübertragung bei 180° Rückstreuung des  $\gamma$ -Quantes entspricht und etwa 250 keV unterhalb der Fotolinie liegt. Oberhalb 3 MeV kommt noch dem Paarbildungseffekt wichtige Bedeutung zu, da er in diesem Energiebereich praktisch der einzig mögliche Wechselwirkungsprozeß ist. Bei diesem Prozeß entsteht ein Elektron-Positron-Paar, wobei jedes Einzelteilchen eine kinetische Energie hat, die der Hälfte des Überschusses der Primärenergie über das Massenäquivalent des Paares entspricht. Elektron wie Positron übertragen ihre kinetische Energie auf den Szintillator; das Positron zerstrahlt nach seiner Abbremsung zusammen mit einem Elektron unter Aussendung von zwei  $\gamma$ -Quanten mit je 0,51 MeV. Je nachdem, ob die Quanten dieser

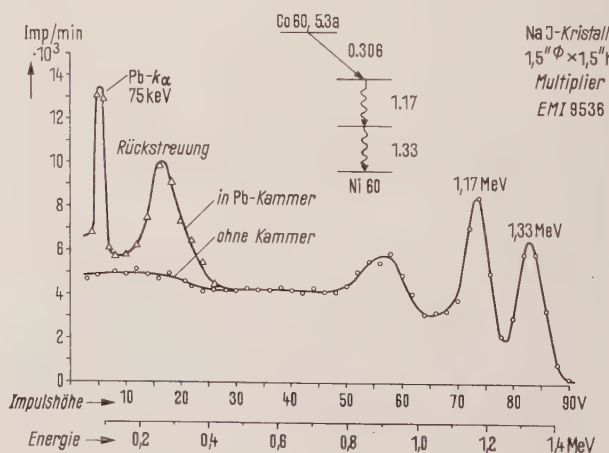


Bild 7 Co 60-Spektrogramm mit und ohne Präparatschirmung

Vernichtungsstrahlung noch Wechselwirkungen im Kristall erleiden oder nicht, erscheinen neben der Paarbildungslinie, die dem gesamten Primärenergiebetrag entspricht und mit der Fotolinie zusammenfällt, häufig noch Energiebeträge im Spektrogramm, die um 1,02 MeV oder um 0,51 MeV kleiner sind. Bild 8 zeigt das Spektrogramm von Na 24 und veranschaulicht diese Verhältnisse recht deutlich.

Sehr oft weist das Spektrogramm noch eine stark ausgeprägte Linie bei sehr kleiner Energie auf (s. Bild 7). Das ist immer der Fall, wenn die  $\gamma$ -Strahlen der strahlenden Substanz durch inneren Fotoeffekt in der Atomhülle des Folgeproduktes oder auch im Abschirmmaterial absorbiert werden. Dabei treten Konversionselektronen und Röntgenstrahlung auf, und es erscheint in solchen Fällen im Spektrum die  $K_{\alpha}$ -Linie des betreffenden Elementes.

Neben diesen Linien tritt praktisch bei jedem  $\gamma$ -Spektrogramm noch eine weitere, weniger ausgeprägte Spitze bei einer Energie von etwa 200 keV auf. Dieses sogenannte Streumaximum rührt von den an den Umgebungsmaterialien des Kristalls (z. B. der Abschirmung) zurückgestreuten Quanten der Primärstrahlung her; ihre Intensität ist vom rückstreuenden Material abhängig (s. Bild 7).

Bei der Aufnahme von  $\gamma$ -Spektren führt die Kombination eines Einkanal-Impulshöhenanalysators, der eine Bereichseinengung zuläßt, mit einem Impulsspektroskop zu einem vorzüglichen Meßverfahren. Geht man davon aus, daß zur Identifizierung eines  $\gamma$ -Strahlers nur die charakteristischen Linien der Totalenergie und ihre unmittelbare Umgebung interessant sind, so kann auf dem Impulsspektroskop die Lage der Linien und damit der interessierende Bereich sofort entnommen werden; beim Ausmessen dieses Bereiches mit dem Diskriminator ist nur das Durchfahren eines beschränkten Impulshöhenbereiches notwendig. Dieses Meßverfahren bringt eine wesentliche Zeitersparnis und liefert trotzdem eine genaue Aussage über die Lage und Intensität der interes-

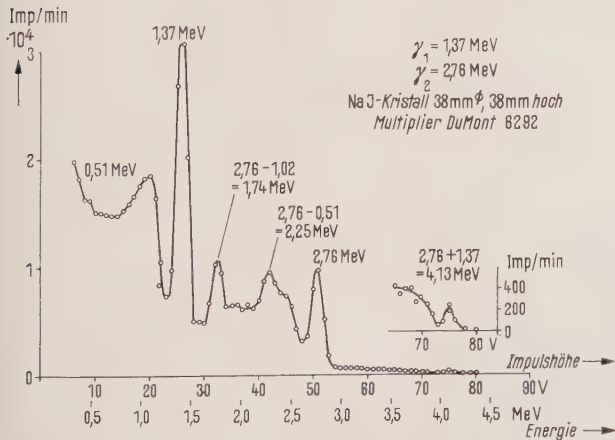


Bild 8 Na 24-Spektrogramm

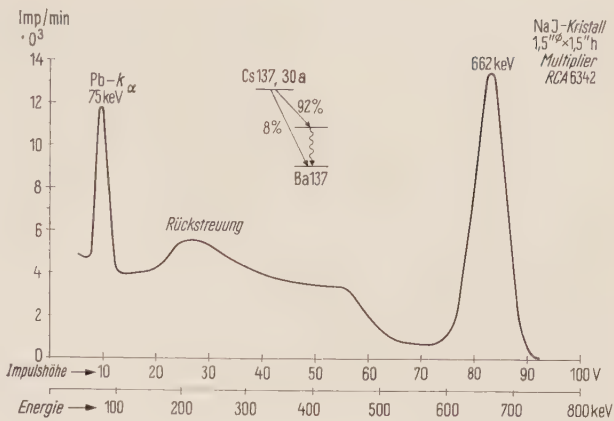


Bild 9 Cs 137-Spektrogramm, aufgenommen mit Einkanal-Impulshöhenanalysator

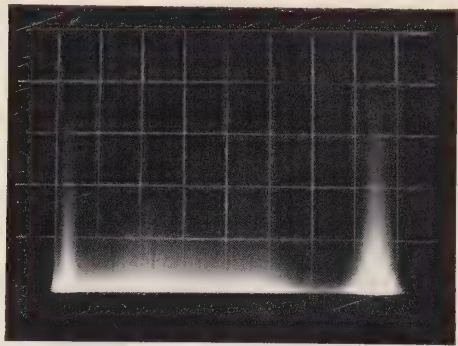


Bild 10 Cs 137-Spektrogramm, aufgenommen mit Impulsspektroskop ohne Graukeil, gleiche Aufnahmebedingungen wie in Bild 9

sierenden Linien. Die Bilder 9 und 10 zeigen vergleichbare Aufnahmen mit den beiden erwähnten Bauteilen. Das Meßverfahren beschränkt die Verwendung eines Vielkanaldiskriminators auf einige wenige Fälle.

Es bleibt nun noch die Frage zu klären, warum im Spektrogramm grundsätzlich keine scharfen Linien, sondern Maxima endlicher Breite entstehen. Die Fotonenemission des Kristalles, der fotoelektrische Prozeß in der Fotokathode und die Sekundäremission an den Dynoden des Multipliers sind rein statistische Prozesse und daher auch mit einem statistischen Fehler behaftet. Deshalb wird, auch wenn die  $\gamma$ -Quanten stets gleiche Energiebeträge an die Szintillatorsubstanz abgeben, wie im Fall des Fotoeffektes, am Ausgang des Multipliers stets eine statistisch verteilte Ladungsmenge auftreten, d. h., die Amplitude der Ausgangsimpulse wird stets um einen Mittelwert schwanken. Eine genau definierte  $\gamma$ -Energie am Eingang des Szintillationszählers kann also im Spektrogramm keine scharfe Linie ergeben, sondern wird stets eine Glockenkurve sein, aus der eine mittlere Impulshöhe  $Z$  und eine Halbwertbreite  $W_{1/2}$  entnom-



men werden können. Als Maß für die Güte eines Szintillationszählers definiert man das Energieauflösungsvermögen

$$A = \frac{W_{1/2}}{Z} \cdot 100\%$$

Dieses ist stark vom verwendeten Szintillator sowie von dem benutzten Multiplier und seinen Betriebsbedingungen abhängig. Je schlechter das Auflösungsvermögen einer Anordnung ist, um so mehr schwanken die Impulshöhen um ihren mittleren Wert und um so größer muß also der Abstand zwischen zwei Energielinien sein, wenn sie noch sauber getrennt werden sollen. Berechnungen, die die genannten Ursachen für die Grenzen des Energieauflösungsvermögens berücksichtigen, führten zu dem Ergebnis, daß ein Wert von 5,4% nicht unterschritten werden kann. Ein solches Auflösungsvermögen läßt sich aber in der Praxis nicht erreichen, da die Berechnung eine Reihe anderer, nur experimentell bestimmbarer Einflüsse nicht berücksichtigen konnte. Auflösungsvermögen von etwa 8 bis 10% gelten in der Praxis als recht gut. Neben dieser Abhängigkeit von dem Szintillator ist das Energieauflösungsvermögen auch von der Energie der einfallenden Strahlung selbst abhängig, und zwar gilt

$$A \approx \frac{1}{\sqrt{E}}$$

d. h., es ist umgekehrt proportional der Wurzel aus der absorbierten Elektronenenergie. Das ist verständlich, denn die Schwankungen der Ausgangsimpulshöhe ist sicher um so kleiner, je größer die Anzahl der erzeugenden Elektronen ist. Die Schärfe der Linien nimmt also mit zunehmender Energie der einfallenden  $\gamma$ -Quanten zu; um definierte Verhältnisse zu haben, pflegt man deshalb das Auflösungsvermögen eines Szintillationszählers stets auf die Cs-Linie zu beziehen. Cs 137 erscheint als

Bezugsnormal besonders geeignet, da es ein monoenergetischer  $\gamma$ -Strahler mit einer mittleren Quantenenergie von 662 keV und einer verhältnismäßig großen Lebensdauer von etwa 33 Jahren ist.

Spektroskopische Aufnahmen der beschriebenen Art können nach vorheriger Eichung der Apparatur dazu dienen, unbekannte Präparate zu identifizieren; die einzelnen Komponenten radioaktiv verseuchter Abwässer beispielsweise können nur auf diese Art bestimmt werden. Daneben lassen sich Spurenelemente in Materialproben dadurch erfassen, daß die Probe im Neutronenfluß eines Reaktors aktiviert und die emittierte  $\gamma$ -Strahlung spektrometrisch erfaßt wird; eine Zersetzung der Probe wird durch dieses Verfahren vermieden. Mit einfachen Apparaturen ist das aber nur möglich, wenn das Spektrum nicht zu kompliziert, eine eindeutige Zuordnung der Linien also möglich ist. Bei komplizierteren Spektren bereitet die Deutung der u. U. überlagerten Maxima oft große Schwierigkeiten. In solchen Fällen benutzt man für die Untersuchungen verhältnismäßig große Kristalle, besonders Bohrlochkristalle, weil bei diesen auch ein großer Teil der Compton- und Paarbildungsquanten vollständig im Kristall absorbiert wird. Die Linie der Primärenergie entsteht dann nicht nur durch den Fotoeffekt, sondern auch durch Comptoneffekt und Paarbildung; denn die Energiebilanz jedes Einzelprozesses liefert bei vollständiger Absorption im Kristall wieder die Primärenergie.

Man ersieht aus diesen Darlegungen, daß die  $\gamma$ -Spektroskopie ein recht schwieriges und vielfältiges Meßverfahren darstellt; während sie bei unkomplizierten Strahlern wirksame Hilfe bei deren Identifizierung leistet, kann sie bei überlagerten Spektren nicht immer eindeutige Aussagen liefern.

## Der KRISTALLOFLEX 4, ein hochkonstanter Röntgenapparat für röntgenographische Analyseverfahren

VON BRUNO MOOK

Die große Genauigkeit der verschiedenen Meßverfahren der Röntgen-Feinstruktur- und Röntgen-Fluoreszenz-Analyse [1, 2, 3, 4] läßt sich nur dann voll ausnutzen, wenn die verwendete Röntgenstrahlung über längere Zeit bezüglich ihrer Zusammensetzung und Intensität konstant ist. Um diese Forderung zu erfüllen, müssen Röhrenspannung und Röhrenstrom konstant gehalten werden. Dabei sollen sich diese Betriebsdaten den einzelnen Analysenproblemen gut anpassen und aus Gründen einer guten Reproduzierbarkeit in festen Stufen einstellen lassen.

Weiterhin sind bei unruhigen Netzen besondere Forderungen an die Dynamik der Stabilisierung zu stellen. Die Stabilisierung muß Netzspannungsstöße schnell ausregeln, da man sonst unzulässig hohe Schwankungen der Meßwerte erhält. Die Röntgenröhre soll so bemessen sein, daß keine Alterungserscheinungen auftreten, wie Aufrauen der Anode und Bedampfen des Röhrenfensters bei maximaler Belastung. Der KRISTALLOFLEX\* 4 (Bild 1)

\* Eingetragenes Warenzeichen

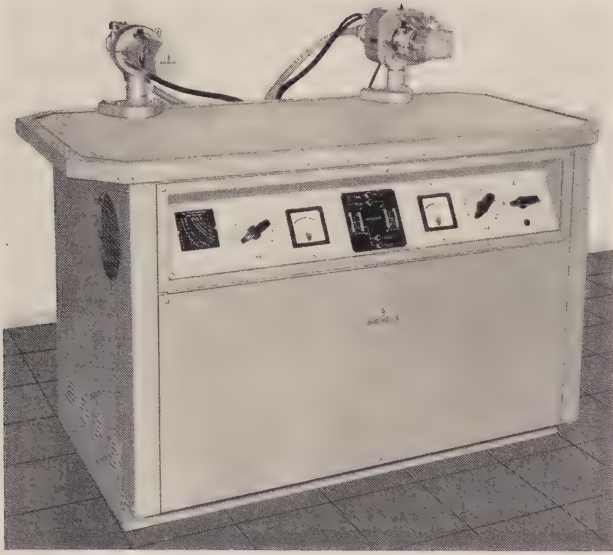


Bild 1 KRISTALLOFLEX 4 zum wahlweisen Betrieb von zwei Röntgenröhren für Feinstruktur- und Fluoreszenzanalysen

ist ein Röntgenapparat, der diesen Anforderungen der Praxis in hohem Maße gerecht wird.

### Aufbau und Wirkungsweise

Der KRISTALLOFLEX 4 wurde nach dem Bausteinprinzip konstruiert. Hochspannungserzeuger, magnetischer Netzspannungs-Konstanthalter, Hochspannungs- und

Röhrenstromstabilisierung sind selbständige Bauteile, die leicht ausgetauscht werden können (Bild 2). Der magnetische Netzspannungs-Konstanthalter und der Hochspannungserzeuger, die beide sehr schwer sind, stehen auf dem Fußboden. Infolgedessen läßt sich der KRISTALLOFLEX leicht aufstellen und montieren.

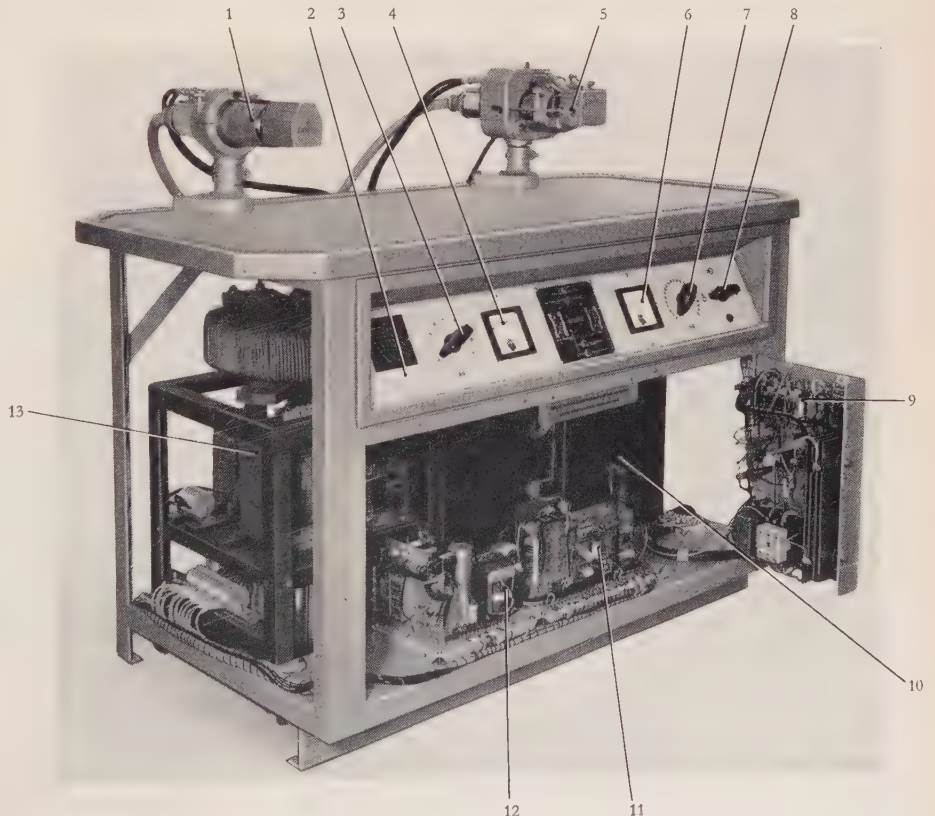
Der Arbeitstisch des KRISTALLOFLEX 4 ist so groß, daß an zwei Röntgenröhren zwei voneinander unabhängige Arbeitsplätze aufgebaut werden können, z. B. einer für Feinstrukturanalyse und einer für Spektralanalyse. Es ist dann möglich, ohne Justierarbeit wahlweise den einen oder den anderen Arbeitsplatz zu benutzen, indem die erzeugte Hochspannung von der einen auf die andere Röntgenröhre umgeschaltet wird.

In Bild 3 ist das Schaltprinzip des KRISTALLOFLEX 4 dargestellt. Die Netzspannung wird von dem magnetischen Konstanthalter vorstabilisiert und dann mit Hilfe eines Stufenschalters an den Eingang des Hochspannungserzeugers gelegt. Der magnetische Konstanthalter dient gleichzeitig als Stufentransformator für die Hochspannungsstufen.

Der Hochspannungserzeuger befindet sich in einem ölgefüllten Kessel und enthält folgende elektrische Bausteine: Hochspannungstransformator, Gleichrichterventil, Glättungskondensator, Meßwiderstand für die elektronische Hochspannungsregelung, Dämpfungswiderstände und Heiztransformatoren für die Röntgenröhre und das Gleichrichterventil sowie Sicherheitsschalter zum Kurzschließen des Hochspannungstransformators im ausgeschalteten Zustand.

- 1 Haubenhalterung mit Röntgenröhre für Fluoreszenzanalysen
- 2 Haubenhalterung mit Röntgenröhre für Feinstrukturanalysen
- 3 Drucktasten zum Umschalten der Hochspannung für die Röntgenröhren
- 4 Stufenschalter für die Röhrenspannung
- 5 Anzeiger für die Röhrenspannung
- 6 Anzeiger für den Röhrenstrom
- 7 Stufenschalter für den Röhrenstrom
- 8 Betriebsschalter
- 9 Hochspannungserzeuger
- 10 Sicherheitsrelais
- 11 Hochspannungsstabilisierung
- 12 Röhrenstromstabilisierung
- 13 Magnetischer Netzspannungs-Konstanthalter

Bild 2 Aufbau des KRISTALLOFLEX 4





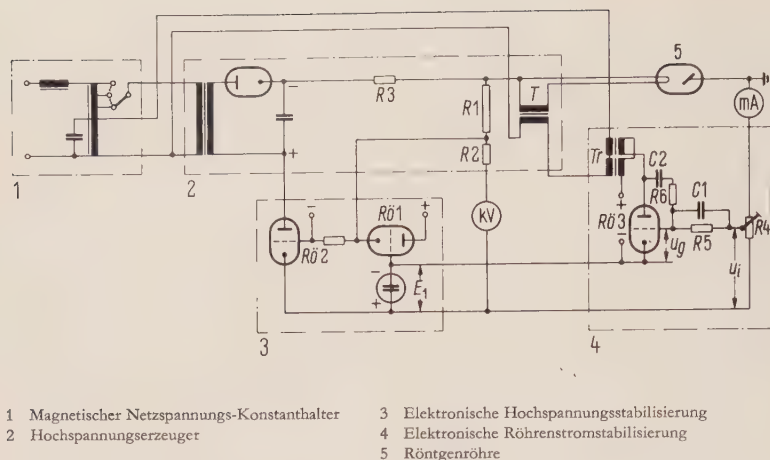


Bild 3 Grundsaltung des KRISTALLOFLEX 4

Die vorstabilisierte Netzspannung wird von dem Hochspannungstransformator auf die erforderliche Betriebsspannung transformiert und von dem Hochvakuumventil in Einwegsichtung gleichgerichtet. Diese gleichgerichtete Spannung wird von Siebgliedern geglättet und auf die Ausgangsbuchse des Hochspannungserzeugers geführt. Ein Hochspannungskabel verbindet die Ausgangsbuchse des Hochspannungserzeugers mit der Kathode der Röntgenröhre, deren Anode geerdet ist. Der Hochspannungskreis wird von der elektronischen Hochspannungsstabilisierung, die zwischen der Anode der Röntgenröhre und dem Pluspol des Hochspannungserzeugers liegt, geschlossen. Die elektronische Röhrenstromstabilisierung greift in die Kathode der Röntgenröhre ein und dient zum Konstanthalten und Einstellen des Röhrenstromes.

Die in Bild 3 nicht eingezeichneten Sicherheitseinrichtungen schützen den Röntgenapparat und die Röntgenröhre vor Schäden bei Überlastung und falscher Bedienung: Ein Überstromrelais schaltet den Apparat ab, wenn der maximal zulässige Röntgenröhrenstrom von 50 mA überschritten wird. Ein weiteres Sicherheitsrelais schützt den Apparat bei einer Unterbrechung oder Störung des Hochspannungskreises. Es schaltet den Apparat ab, wenn ein bestimmter Mindeströhrenstrom unterschritten wird. Der in dem Hochspannungskreis eingebaute Schutzschalter schließt den Hochspannungskondensator kurz, so daß im ausgeschalteten Zustand des Apparates niemals Hochspannung am Kabel liegen kann.

Zur Kühlung der Röntgenröhre ist ein Kühlwasserdurchfluß von 4 l/min erforderlich. Ein in die Ausflußleitung des Kühlwasserkreises eingebauter Durchflußmesser überwacht den Kühlwasserkreis: Ist der Kühlwasserkreis unterbrochen oder fließen weniger als 4 l/min durch die Röhre, so ertönt ein Warnzeichen, und ein Verzögerungsrelais schaltet den Apparat ab, wenn die Störung des Kühlwasserkreises länger als 20 s dauert.

## Elektronische Hochspannungsstabilisierung

Die elektrische Wirkungsweise der Hochspannungsregelung ist aus Bild 3 ersichtlich. Die Hochspannung wird an dem hochohmigen Spannungsteiler  $R_1/R_2$  gemessen. An dem Spannungsteilerwiderstand  $R_2$  wird ein Teil der Hochspannung abgegriffen, der als Istspannung für die Hochspannungsregelung dient. Gegen diese Spannung wird die konstante Vergleichsspannung  $E_1$  geschaltet, so daß die Spannungsdifferenz am Gitter der Vorverstärkerröhre  $Rö_1$  wirksam wird. Von der Röhre  $Rö_1$ , die aus Potentialgründen in Anodenbasisschaltung arbeitet, wird die zur Röntgenröhre in Reihe geschaltete Längsröhre  $Rö_2$  der Hochspannungsstabilisierungsgesteuert. Das Hauptmerkmal dieses Regelkreises ist, daß die Röhre  $Rö_2$  als Stellglied unmittelbar in den Hochspannungskreis eingreift, wodurch ungewollte Änderungen der Hochspannung sekundärseitig sofort ausgeregelt werden. Da die Hochspannung direkt an der Röntgenröhre (an  $R_1/R_2$ ) gemessen wird, ist sichergestellt, daß alle Einflüsse, wie Netzspannungs- und Netzfrequenzänderungen und Erwärmung der Wicklungen des Hochspannungstransformators, erfaßt werden, die eine Änderung der Hochspannung verursachen.

Die Konstanz der Hochspannung wird in erster Linie von der Stabilität des Spannungsteilverhältnisses des Meßwiderstandes  $R_1/R_2$  bestimmt. Um eine gute Stabilität dieses Spannungsteilers zu gewährleisten, ist die Belastbarkeit des Meßwiderstandes entsprechend hoch gewählt worden; dabei werden nur Präzisionswiderstände verwendet.

Die Verstärkung des Hochspannungsreglers ist so groß, daß bei einer Netzspannungsänderung um  $\pm 10\%$  und

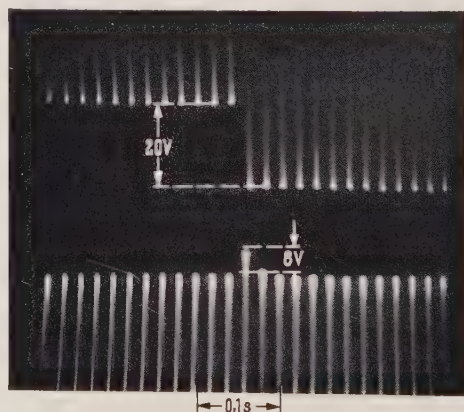


Bild 4 Dynamisches Verhalten des magnetischen Netzspannungskonstanzhalters. Netzspannungsstöße von 20V werden in drei bis vier Perioden der Netzspannung ausgeregelt

einer Netzfrequenzänderung um  $\pm 1$  Hz die an der Röntgenröhre liegende Hochspannung in allen Stufen um weniger als 0,1% schwankt.

Der magnetische Netzspannungs-Konstanthalter wurde vor den eigentlichen Regelkreis geschaltet. Dadurch werden Netzspannungsänderungen von  $\pm 10\%$  auf  $\pm 1\%$  herabgesetzt, und die Regelstrecke der elektronischen Hochspannungsregelung wird verhältnismäßig klein ( $\pm 2$  kV). Außerdem gewährt diese Schaltung wegen des geringen Aufwandes an Bauelementen eine große Betriebssicherheit.

Das Oszillogramm (Bild 4) gibt das dynamische Verhalten des magnetischen Konstanthalters bei einem Netzspannungsstoß von 20 V wieder. Man sieht, daß eine Änderung der Eingangsspannung um 10% in etwa 3 bis 4 Perioden der Netzfrequenz ausgeglet wird.

### Röntgenröhre und elektronische Röhrenstromstabilisierung

Bild 5 zeigt den Schnitt durch eine Hochleistungsröhre für 2000 W, die für Röntgen-Spektralanalysen mit verschiedenen Anodenmaterialien verwendet wird. Da von der Gesamtleistung der Röhre nur etwa 0,3% in Strahlungsleistung umgesetzt werden und die übrige Leistung als Wärme abgeführt werden muß, wird die Anode der Röhre intensiv mit Wasser gekühlt. Aus diesem Grund ist die Anode geerdet, wogegen die Kathode an der Hochspannung liegt. Die Kathode wird direkt geheizt. Da außerdem bei den erforderlichen hohen Spannungen die Röntgenröhre praktisch im Sättigungsgebiet arbeitet, ist der Emissionsstrom durch die Heizung der Kathode bestimmt und unabhängig von der Röhrenspannung einstellbar.

Bild 3 läßt die Grundschaltung der elektronischen Röhrenstromstabilisierung erkennen. Die Primärwicklung des Heiztransformators  $T$  für die Röntgenröhre liegt über der Wechselstromwicklung eines Transduktors  $Tr$  an der stabilisierten Ausgangsspannung des magnetischen Netzspannungs-Konstanthalters. Die Vormagnetisierung des Transduktors  $Tr$  und somit sein Wechselstromwiderstand wird von dem Anodenstrom der Verstärkerröhre  $R\ddot{o} 3$ , die im Gleichstromkreis des Transduktors liegt, gesteuert. Die Heizung der Röntgenröhre und somit der Emissionsstrom sind also von der Vormagnetisierung des Transduktors abhängig. Der Widerstand  $R 4$  ist als Stufenschalter ausgebildet und dient als Sollwert-einsteller.

Der Röntgenröhrenstrom erzeugt an dem Widerstand  $R 4$  einen ihm proportionalen Spannungsabfall  $u_i$ , der als Istspannung für die Regelung dient. Diese Spannung  $u_i$  wird gegen die konstante Vergleichsspannung  $E_1$  ge-

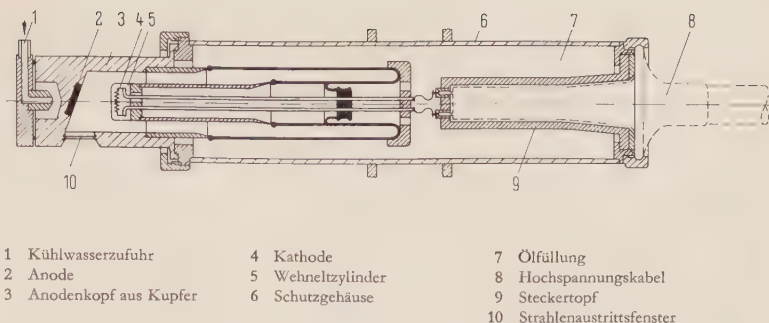


Bild 5 Schnitt durch eine Hochleistungs-Röntgenröhre

schaltet, so daß an dem Gitter der Verstärkerröhre  $R\ddot{o} 3$  die Differenz

$$u_g = E_1 - u_i$$

wirksam wird.

Steigt nun der Röhrenstrom z. B. infolge einer Netzspannungsänderung an, so steigt auch die dem Röhrenstrom proportionale Spannung  $u_i$ , die negative Gitterspannung  $u_g$  vergrößert sich, und der Anodenstrom sinkt. Damit verringert sich die Vormagnetisierung des Transduktors; sein Wechselstromwiderstand wird größer, d. h., an dem Heiztransformator liegt eine niedrigere Spannung, und als Folge davon sinkt der Röntgenröhrenstrom, bis der Sollwert erreicht ist. Bei einem Absinken des Röhrenstromes unter den Sollwert verlaufen die Regelvorgänge in umgekehrter Weise. Die Rückführglieder  $C_1/R_5$  und  $C_2/R_6$  geben dem Röhrenstromregler ein günstiges dynamisches Regelverhalten (PID-Regelung). Die Verstärkung ist so groß, daß bei einer Netzspannungsänderung um  $\pm 10\%$  und einer Netzfrequenzänderung um  $\pm 1$  Hz der Emissionsstrom um weniger als 0,1% schwankt.

Bild 6 zeigt das dynamische Verhalten der Röhrenstromstabilisierung. Man sieht, daß der Regelvorgang in etwa 10 Perioden der Netzfrequenz abgeklungen ist.

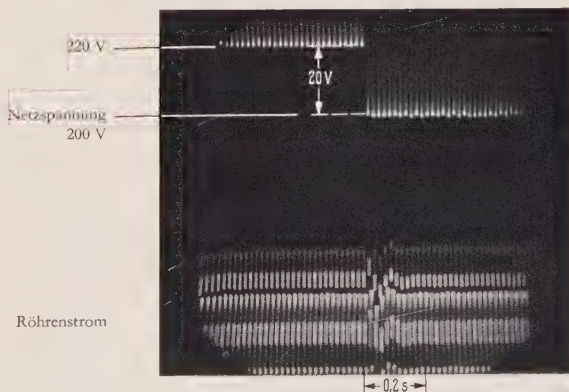


Bild 6 Dynamisches Verhalten der Röhrenstromstabilisierung. Der Regelvorgang ist bei einem Netzspannungsstoß von etwa 20 V in etwa 10 Perioden der Netzfrequenz, also in 0,2 s, abgeklungen. Der Röhrenstrom wurde hierbei an der Erdseite der Röhrenstromstabilisierung gemessen. Er zeigt eine Welligkeit, die von der ungleichen Emission der direkt geheizten Kathode herrührt



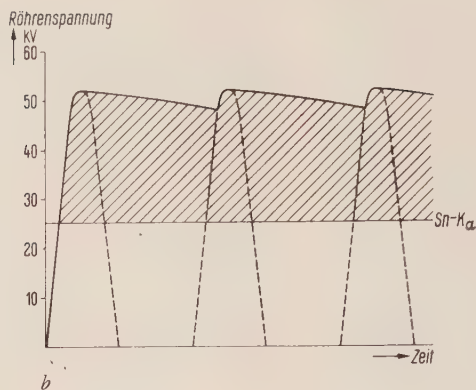
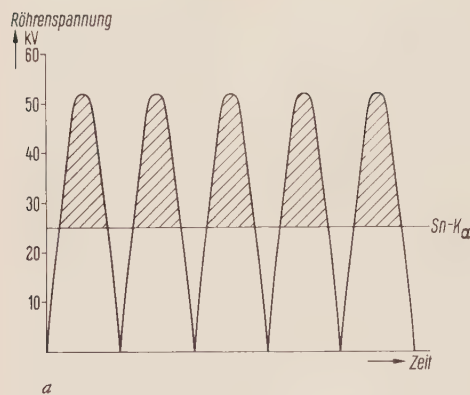


Bild 7 Wirksame Anregungsspannung (schraffierte Bereiche) für die Sn-K $\alpha$ -Strahlung bei Vollweggleichrichtung (a) und geglättete Hochspannung (b)

### Welligkeit der Hochspannung

Bei Fluoreszenzanalysen wird die charakteristische Linienstrahlung eines Elementes, also die Fluoreszenzstrahlung einer Probe, von der Primärstrahlung der Röntgenröhre nur dann angeregt, wenn die Energie der Primärstrahlung größer ist als die Anregungsenergie der Fluoreszenzstrahlung. Das bedeutet, daß die Welligkeit der an der Röntgenröhre liegenden Hochspannung beim praktischen Betrieb eine große Rolle spielt. Wird die Röntgenröhre etwa mit ungeglätteter Hochspannung betrieben, so wird nur dann Fluoreszenzstrahlung angeregt, wenn der Augenblickswert der an der Röhre liegenden Spannung und damit die Energie der Primärstrahlung die Anregungsenergie der Linienstrahlung übersteigt. Die Fluoreszenzstrahlung ist also bei diesem Betrieb über eine Periodendauer nicht konstant. In Bild 7a gibt die schraffierte Fläche den Bereich an, in dem Fluoreszenzstrahlung abgegeben wird. Man sieht leicht ein, daß dieser Bereich um so kleiner wird, je kleiner das Verhältnis zwischen der Hochspannung an der Röhre und der Energie der anzuregenden Strahlung wird. Noch

ungünstiger werden die Verhältnisse, wenn statt der gezeichneten Vollweggleichrichtung Halbweggleichrichtung angewandt wird.

Bei einem Betrieb der Röntgenröhre mit geglätteter Hochspannung geringer Welligkeit wird die volle Periode zur Anregung ausgenutzt (Bild 7b). Die Nutzstrahlung schwankt hier nur noch im Rhythmus der geringen Restwelligkeit der Hochspannung. Bei genügend großem Abstand zwischen der Spannung an der Röntgenröhre und der Anregungsenergie der Linienstrahlung fallen die Restschwankungen über eine Periode kaum noch ins Gewicht.

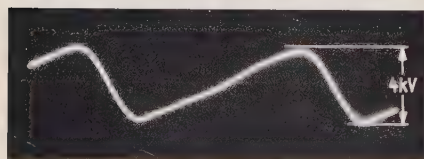
Gegenüber dem Betrieb mit ungeglätteter Hochspannung (Bild 7a) wird die Kathode bei Verwendung geglätteter Hochspannung (Bild 7b) geschont und die Leistung der Röhre voll ausgenutzt.

Ein weiterer Vorzug der geglätteten Hochspannung ist die gleichmäßige Belastung der Detektoren [5] für die Röntgenstrahlung. Bei dem Betrieb mit ungeglätteter Hochspannung werden die Detektoren spezifisch höher belastet – Totzeiteffekte und Zählverluste machen sich schon bei niedrigerer Impulsrate als beim Betrieb mit geglätteter Hochspannung bemerkbar. Ganz besonders treten diese Erscheinungen beim Geiger-Müller-Zählrohr auf, das mit seiner Totzeit von 100  $\mu$ s bereits bei geringen Impulsraten »verstopft«.

Im Hochspannungserzeuger des KRISTALLOFLEX 4 bewirken entsprechend ausgelegte Siebglieder – die Kapazität des Ladekondensators beträgt 0,2  $\mu$ F – eine gute Glättung der Hochspannung und somit eine Ausnutzung der besprochenen Vorteile für den praktischen Betrieb. Die Amplitude der dem Gleichstrommittelwert überlagerten Wechselspannung beträgt bei dem Maximalstrom von 50 mA etwa 2 kV, das sind etwa 40 V/mA. Bezogen auf die am KRISTALLOFLEX 4 einstellbaren Hochspannungsstufen beträgt die relative Welligkeit der Hochspannung 10% bei 20 kV und 3,5% bei der Maximalspannung von 60 kV. Die Bilder 8a und b zeigen die Welligkeit der Hochspannung, gemessen an der Erdseite eines kapazitiven Spannungsteilers, bei einem Betrieb mit 40 kV und 6 mA sowie 40 kV und 50 mA.



a Röhrenstrom 6 mA  
Röhrenspannung 40 kV  
Welligkeit 0,7 kV<sub>ss</sub>



b Röhrenstrom 50 mA  
Röhrenspannung 40 kV  
Welligkeit 4 kV<sub>ss</sub>

Bild 8 Welligkeit der Hochspannung des KRISTALLOFLEX 4

### Konstanz der Strahlungsleistung

Die auf 0,1 % konstant gehaltene Röhrenspannung und der ebenfalls auf 0,1 % konstantgehaltene Röhrenstrom ergeben entsprechend der Gleichung

$$I = C U^2 i$$

$I$  Strahlungsleistung  
 $C$  Proportionalitätsfaktor  
 $U$  Röhrenspannung  
 $i$  Röhrenstrom

eine Konstanz der Strahlungsleistung von 0,3 % bei 10 %iger Netzspannungsänderung.

Zur Überprüfung der Konstanz der Strahlungsleistung über längere Zeiten wurde an einem serienmäßigen Gerät die Intensität der Mo- $K\alpha$ -Fluoreszenzstrahlung über einen Zeitraum von  $\approx 20$  Stunden gemessen und alle 2 Minuten ein Meßwert mit Hilfe eines Zählbetrag-Zeit-Druckers registriert. Es wurden dabei jeweils etwa 900 000 Impulse aufgenommen,

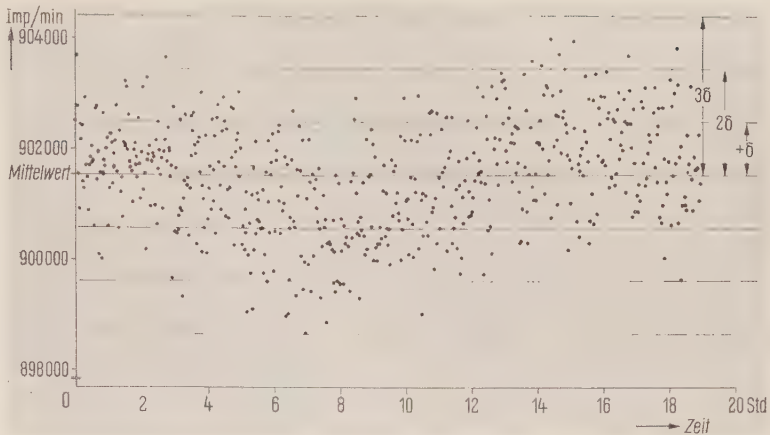


Bild 9 Kollektiv einer Konstanzmessung der Strahlungsleistung des KRISTALLOFLEX 4 über 20 Stunden

und zwar in einer Meßzeit von 1 min. Bild 9 zeigt das Ergebnis der Messung. Die aufgenommenen Impulszahlen schwanken nach den Gesetzen der Poisson-Verteilung. Nach diesen Gesetzen ist die Standardabweichung des Meßwertes proportional der Wurzel der gezählten Impulse. Die statistische Fehlerrechnung [1] zeigt, daß Schwankungen, die größer sind als  $\pm 3\sigma$ , nur sehr selten auftreten. In der Tat findet man, daß kein Meßwert aus der  $\pm 3\sigma$ -Grenze herausfällt, daß die Konstanz des Apparates also tatsächlich auch über längere Zeiten 0,3 % beträgt.

#### Schrifttum

- [1] Neff, H.: Grundlagen und Anwendung der Röntgen-Feinstruktur-Analyse. R. Oldenbourg Verlag, München 1959
- [2] Neff, H.: Röntgenographische Analysenverfahren. VDI-Zeitschrift 102 (1960) 1433 bis 1437
- [3] Tögel, K.: Spektrochemische Analyse mit Röntgenstrahlen. Siemens-Zeitschrift 32 (1958) 371 bis 379
- [4] Tögel, K.: Über die Röntgenfluoreszenzanalyse im Vakuum auf die Elemente der Ordnungszahlen 12 bis 22. Siemens-Zeitschrift 34 (1960) 726 bis 733
- [5] Neff, H.: Messung von Röntgenstrahlen mit verbesserten Detektoren und Zählmethoden. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 655 bis 660

Maximale Belastbarkeit	2000 W
Hochspannung	20 bis 60 kV Gleichspannung, einstellbar in Stufen von je 5 kV
Welligkeit der Hochspannung	etwa 40 V/mA
Röhrenstrom	6 bis 50 mA, einstellbar in Stufen von je 2 mA
Stabilisierung	Hochspannung und Röhrenstrom werden bei Netzspannungsänderungen $\pm 10\%$ auf $\pm 0,1\%$ konstant gehalten
Konstanz der Strahlungsleistung der Röntgenröhre	$\pm 0,3\%$ bei Netzspannungsänderungen $\pm 10\%$
Netzanschlußwerte	220 V $\pm 10\%$ , 50 oder 60 Hz, Stromaufnahme max. 25 A

Tafel 1 Die wichtigsten technischen Daten des KRISTALLOFLEX 4

## Ein verbessertes Verfahren zur röntgenographischen Bestimmung des Restaustenits in gehärteten Stählen

VON GERHARD LUCAS UND HANS NÜTZEL

Die quantitative Analyse einer Legierung ergibt zwar deren Zusammensetzung aus den chemischen Elementen, kann aber dort, wo eine Legierung in verschiedenen Phasen vorliegt, nichts über die Mengenanteile der Phasen aussagen. Für die technische Verwendung dieser Legierungen ist aber wegen der unterschiedlichen Eigen-

schaften der einzelnen Phasen, z. B. hinsichtlich Festigkeit und Bearbeitbarkeit, eine möglichst genaue quantitative Phasenbestimmung wichtig. Weil das Atomgitter der verschiedenen Phasen einer Legierung unterschiedlich aufgebaut ist, sind die Phasen röntgenographisch in Feinstrukturuntersuchungen unterscheidbar. Ein derar-



tiges Problem liegt bei der Bestimmung des Restaustenitanteils vor, d. h. der nicht umgewandelten Fe- $\gamma$ -Phase in gehärteten Werkzeugstählen.

Bei der martensitischen Härtung von kohlenstoffhaltigen Stählen wird der Stahl aus dem Gebiet der  $\gamma$ -Phase rasch bis unterhalb des Martensitpunktes  $M_s$  abgeschreckt. Dieser Punkt ist durch die Temperatur ausgezeichnet, bei der das kohlenstoffhaltige  $\gamma$ -Eisen beginnt, in ein tetragonal verzerrtes  $\alpha$ -Eisen, den Martensit, sprunghaft umzuklappen. Der Martensitpunkt hängt ab vom Kohlenstoff- und Legierungsgehalt des Stahles. Wird ein Werkzeugstahl nur auf Raumtemperatur – wie meistens üblich – und nicht auf tiefe Temperaturen abgekühlt, so wandelt sich die  $\gamma$ -Phase nicht vollständig in Martensit um, sondern es bleibt ein bestimmter Bruchteil der  $\gamma$ -Phase erhalten. Im Gefüge eines solchen Stahles liegen dann zwei verschiedene Phasen nebeneinander vor:

1. das tetragonal verzerrte kubisch-raumzentrierte Atomgitter des  $\alpha$ -Eisens (Martensit)
2. das kubisch-flächenzentrierte Gitter des  $\gamma$ -Eisens (Austenit)

Außerdem können noch Anteile von Eisenkarbiden und Karbiden der Legierungselemente vorliegen, die bei diesen Untersuchungen aber vernachlässigt werden. Das Mengenverhältnis von Martensit und Restaustenit hängt ab vom Martensitpunkt des Stahles, von der Austenitisierungstemperatur und -zeit sowie von der Temperatur des Abschreckmittels.

Martensit und Austenit unterscheiden sich in ihren mechanischen und magnetischen Eigenschaften. So ist das spezifische Volumen des Martensits rund 3% größer als das des Austenits. Die Härte des Martensits ist höher, die Zähigkeit geringer als die des Austenits. Martensit ist ferromagnetisch, Austenit paramagnetisch.

Bei Präzisionsteilen aus gehärteten Stählen wirkt sich der Restaustenit auf die Maßbeständigkeit nachteilig aus, denn er kann sich bei erhöhter Betriebstemperatur oder mechanischer Beanspruchung unter Volumenvergrößerung in Martensit umwandeln. Maßstabile Teile sollen daher keinen oder nur einen sehr geringen Anteil an Restaustenit im Gefüge enthalten.

Zur Bestimmung des Restaustenits in gehärteten Stählen gibt es drei Verfahren:

1. Bestimmung des Restaustenits an Schlißbildern mit dem Lichtmikroskop. Diese Methode ist nur dann anwendbar, wenn größere nicht umgewandelte Restaustenitbereiche vorliegen, was bei richtiger Härtung von Werkzeugstahl nicht vorkommt. In elektronenmikroskopischen Aufnahmen ist der Restaustenit bei stärkeren Vergrößerungen deutlich zu erkennen.
2. Bestimmung des Restaustenits durch Messungen der Sättigungsmagnetisierung. Der Restaustenit im Stahl ergibt eine dem Mengenanteil proportionale Erniedrigung der Sättigungsmagnetisierung. Dieses Verfahren hat folgende Nachteile:

- a) Für die Bestimmung des Restaustenits ist immer dieselbe Probenform notwendig, da für verschiedene Probenformen unterschiedliche Entmagnetisierungsfaktoren in die Berechnung eingehen.
- b) Außer Martensit geben auch die beiden Formen des Eisenkarbids, Zementit und  $\epsilon$ -Karbon, einen unterschiedlichen Beitrag zur Sättigungsmagnetisierung. Der Mengenanteil der Karbide ist in den meisten Fällen nicht genau bekannt.

3. Bestimmung des Restaustenits auf röntgenographischem Wege. Dieses Verfahren ermöglicht eine zerstörungsfreie und von der Probenform weitgehend unabhängige Bestimmung des Restaustenits.

Die röntgenographische Restaustenitbestimmung wurde zuerst von K. TAMARU und S. SAKITO [1] angewandt. Eine Verbesserung des Verfahrens, nach der heute meistens gearbeitet wird, wurde 1948 von B. L. AVERBACH und M. COHEN [2] sowie 1952 von K. BEU [3] veröffentlicht.

Bestrahlt man eine restaustenithaltige Stahlprobe mit monochromatischer Röntgenstrahlung nach dem Debye-Scherrer-Verfahren, so erscheinen auf dem Film die Linien des Martensits und des Austenits nebeneinander.

Die einzelnen Linien sind aufgrund des unterschiedlichen Atomgitteraufbaus der beiden Phasen leicht dem Martensit und Austenit zuzuordnen. Das Intensitätsverhältnis der Linien von Martensit und Austenit ergibt ein Maß für den Restaustenitanteil im Gefüge. Die Debye-Scherrer-Linien sind bei Aufnahmen an gehärteten Stählen infolge der inneren Spannungen und der tetragonalen Verzerrung des Gitters sehr breit und verwaschen (Bild 1). Die tetragonale Verzerrung ergibt sich aus der zwangsweisen Einlagerung des Kohlenstoffs im  $\alpha$ -Gitter des Martensits. Ebenso sind die Eigenspannungen eine zwangsläufige Folge der Martensitumwandlung. Die Verzerrungen und Eigenspannungen werden beim Anlassen der Probe vermindert; bei den üblichen Anlaßtemperaturen bleiben die Linien aber noch so breit, daß meist ein ungünstiges Verhältnis von Linienschwärzung zu Untergrund entsteht. AVERBACH und COHEN haben daher zur Unterdrückung des Streuuntergrundes für die Filmaufnahmen in einer Vakuum-Debye-Kammer monochromatisierte Kobaltstrahlung verwendet. Die An-

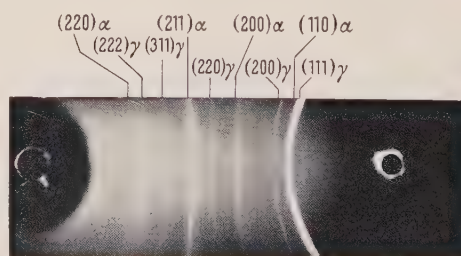


Bild 1 Röntgenbeugungsaufnahme an einem überhitzten gehärteten Stahl 100 Cr 2

wendung des Monochromators ergibt zwar ein wesentlich besseres Verhältnis von Linienschwärzung zu Untergrund als die einfache Filterung mit einer Folie, bedingt aber wegen der Intensitätsverluste am Monochromator sehr lange Belichtungszeiten. So betrug nach Angaben von AVERBACH und COHEN die Belichtungszeit für kleine Restaustenitgehalte 24 Stunden. Die Filmaufnahmen wurden photometriert und mit Hilfe der Schwärzungskurve umgerechnet. Die ausplanimetrierten Intensitäten der Martensit- und Austenitlinien wurden untereinander verglichen. Dieses Verfahren ist wegen des großen Zeitaufwandes für Reihenuntersuchungen unwirtschaftlich.

Bei Anwendung eines Zählrohrgoniometers [4] entfällt die Umrechnung von Filmschwärzung auf Intensitätskurve. Die Fokussierung nach BRAGG-BRENTANO, wie sie bei Zählrohrgoniometern üblich ist, ergibt schärfere Linien und damit ein besseres Verhältnis von Linienmaximum zu Streuuntergrund. Bild 2 zeigt das Diagramm von Probe 1 eines Stahles 100 CrMn 6, der überhitzt gehärtet wurde, so daß sein Restaustenitgehalt 33 % betrug. Die stärksten Linien sind  $(111)\gamma$  und  $(110)\alpha$ . Das maximale Verhältnis von Linienintensität  $(110)\alpha$  zu Streuuntergrund beträgt bei reinem Martensit 8:1. Die Aufnahme wurde mit KRISTALLOFLEX\*4, Zählrohrgoniometer, Zählrohr mit Argonfüllung und großem Strahlungsmeßgerät GS-DMZ von Siemens & Halske durchgeführt.

Der Abstand zwischen  $(110)\alpha$  und  $(111)\gamma$  ist so gering, daß beide Linien nicht mehr vollständig getrennt erscheinen, sondern ineinanderfließen. Die anderen auftretenden Austenitlinien sind aufgrund ihres schlechten Verhältnisses von Linienintensität zu Streuuntergrund bei kleinen Restaustenitanteilen nur ungenau auswertbar. Daher wurde der Restaustenitanteil bei Verwendung von Chromstrahlung an der  $(111)\gamma$ - und der  $(110)\alpha$ -Linie bestimmt. Hierzu wird die  $(110)\alpha$ -Linie symmetrisiert (Bild 3) und als Integralintensität für die  $\gamma$ -Linie die Flächendifferenz zwischen gemessener und symmetrisierter Linie angenommen.

Die Auswertung der Intensitäten durch Symmetrisieren der  $(110)\alpha$ -Linie erscheint aus folgenden Gründen unzulässig:

Die Reflexion von monochromatischer Strahlung an einem Kristall ergibt eine symmetrische Röntgenlinie. Bei der Reflexion der Chromstrahlung am Martensit entstehen aber für die  $K\alpha_1$  und  $K\alpha_2$ -Strahlung zwei Linien mit unterschiedlichen Reflexionswinkeln, deren Intensitätsverhältnis 2 : 1 beträgt. Außerdem entstehen durch die tetragonale Verzerrung des Martensits ebenfalls zwei Reflexionslinien, entsprechend der  $(110)\alpha$ -Linie einerseits und der  $(101)\alpha$  sowie der  $(011)\alpha$  andererseits. Die Überlagerung dieser insgesamt vier Linien ergibt die gemessene  $(110)\alpha$ -Linie. Da sie aus der Überlagerung von vier symmetrischen Linien unterschiedlicher Intensi-

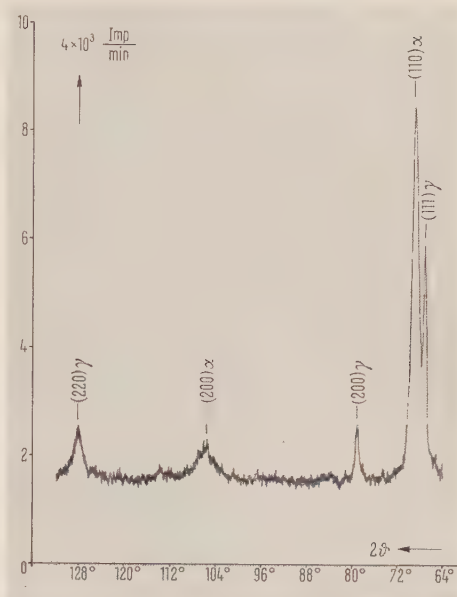


Bild 2 Zählrohrdiagramm eines überhitzt gehärteten Stahles 100 CrMn 6, aufgenommen mit Cr-Strahlung, 0,25 mm V-Filter und Argonauflösezahlrohr. Aufnahmedaten: 28 kV, 10 mA, Winkelgeschwindigkeit des Zählrohrs  $1/2^\circ$  je min. Zählrohrblende 0,4 mm, Aperturblende 1,4 mm und Dämpfung 13,4 s

täten besteht, wird sie im allgemeinen nicht mehr symmetrisch sein.

Die Auswertung durch Symmetrisieren der  $(110)\alpha$ -Linie kann daher zumindest bei kleinen Restaustenitgehalten erheblich falsche Werte ergeben. In diesen Fällen ist aber auch die Auswertung der anderen  $\gamma$ -Linien zu ungenau. Die Bestimmung des Restaustenitanteils mit Chromstrahlung bleibt daher auf Restaustenitgehalte über 10 % beschränkt.

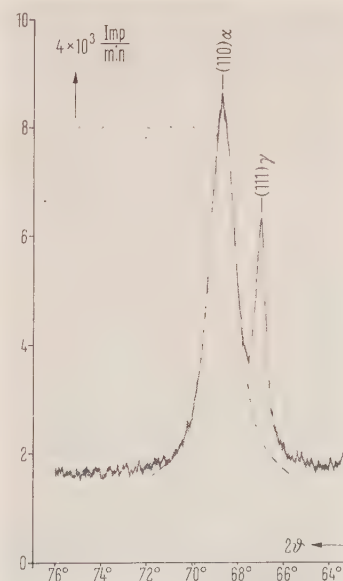


Bild 3 Bestimmung der Integralintensitäten der  $(110)\alpha$ - bzw.  $(111)\gamma$ -Linie durch Symmetrisieren. Aufnahmedaten wie bei Bild 2, außer Änderung der Winkelgeschwindigkeit von  $1/2^\circ$  je min auf  $1/4^\circ$  je min

\* Eingetragenes Warenzeichen



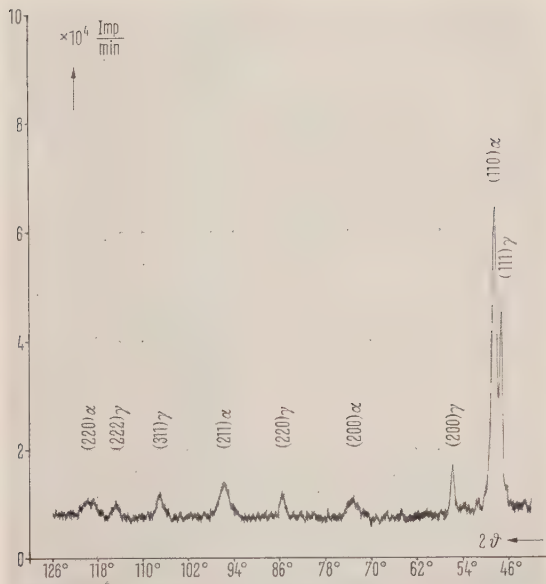


Bild 4 Zählrohrdiagramm des Stahles von Bild 2 und 3 mit Co-Strahlung, 0,25 mm Eisenfilter und Szintillationszähler. Aufnahmebedingungen: 28 kV, 12 mA, Winkelgeschwindigkeit des Zählrohrs 1/2°m je in, Zählrohrblende 0,4 mm, Aperturblende 1,7 mm und Dämpfung 13,4 s

Für Untersuchungen an Stählen wird allgemein Chrom-, Eisen- oder Kobaltstrahlung verwendet. Strahlen kürzerer Wellenlänge, z. B. Cu, Mo, Ag, regen in erheblichem Umfange die Eigenstrahlung des Eisens an, es ergibt sich deshalb eine starke Untergrundschwärzung. In geringerem Umfange wird auch schon bei Kobaltstrahlung die Eiseneigenstrahlung angeregt. Bild 4 zeigt ein Übersichtsdiagramm mit Kobaltstrahlung an Probe 1. Bei Verwendung eines Szintillationszählers mit nachgeschaltetem Differentialdiskriminator erhält man ein etwas besseres Verhältnis von Linienintensität zu Untergrund als bei Registrierung mit Argonzählrohr. Bild 4 wurde mit Szintillationszählrohr und Diskriminator aufgenommen.

Da man bei Kobaltstrahlung mehr Linien als bei Chromstrahlung erhält, konnten bei der Restaustenitbestimmung die Linien  $(200)\gamma$ ,  $(220)\gamma$  und  $(311)\gamma$  gemessen und mit den Intensitäten der  $(200)\alpha$  und  $(211)\alpha$  verglichen werden. Bei Restaustenitgehalten über 10% erhält man nach diesen Verfahren befriedigende Ergebnisse, allerdings ist der Zeitaufwand für eine Bestimmung mit 2 Stunden etwas hoch. Für Restaustenitgehalte unter 10% sind die ermittelten Werte unsicher, wenn nicht sehr lange Zählzeiten angewendet werden.

Eine Verbesserung des Intensitätsverhältnisses von Linienmaximum zu Untergrund ist durch Verwendung eines Monochromators möglich. Durch die Reflexion der Strahlung am Monochromatorkristall entsteht aller-

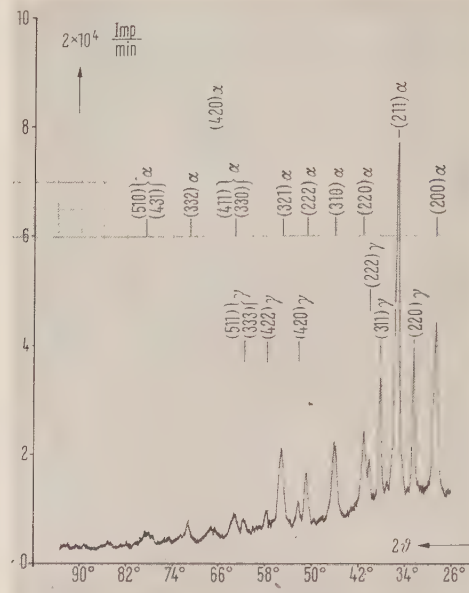


Bild 5 Zählrohrdiagramm derselben Stahlprobe, aufgenommen mit Mo-Strahlung, 0,25 mm Zr-Filter und Krypton-Auslösezählrohr. Aufnahmebedingungen: 33 kV, 16 mA, Winkelgeschwindigkeit des Zählrohrs 1/2° je in, Zählrohrblende 0,4 mm, Aperturblende 2,4 mm und Dämpfung 13,4 s

dings ein erheblicher Intensitätsverlust. Da das Ausenden von Röntgenstrahlen ein statistischer Vorgang ist, wird der bei der Registrierung auftretende Fehler um so größer, je kleiner die Impulsraten je Minute sind. Damit für die Restaustenitbestimmung der statistische Fehler nicht zu groß wird, müssen bei der Verwendung eines Monochromators ebenfalls längere Zählzeiten gewählt werden.

Messungen mit Zählrohrngoniometer zur Bestimmung kleinerer Restaustenitgehalte ergaben somit bei Cr- und Co-Strahlung keine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Filmverfahren.

Strahlung mit kürzerer Wellenlänge als Kobaltstrahlung kann verwendet werden, wenn es gelingt, den störenden Einfluß der Eiseneigenstrahlung zu unterdrücken. Je kürzer die verwendete Wellenlänge ist, desto mehr Reflexionen treten auf. Die einzelnen Reflexionslinien rücken aber enger zusammen und sind bei Aufnahmen mit zu kurzer Wellenlänge nicht mehr zu trennen. Die Versuche zur Restaustenitbestimmung wurden mit Molybdänstrahlung fortgesetzt.

Zur Unterdrückung der Eiseneigenstrahlung gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Verwendung eines Kryptonzählrohrs mit vorgeschaltetem Zirkonfilter. Die Absorptionskante des Kryptons liegt sehr nahe der anregenden Molybdän- $K\alpha$ -Strahlung. Ein Auslösezählrohr mit Kryptonfüllung

hat daher für Molybdänstrahlung eine weit größere Ansprechwahrscheinlichkeit als für Eiseneigenstrahlung.

Der Absorptionskoeffizient des Zirkons ist für die  $K\alpha$ -Eisenstrahlung rund 16 mal so groß wie für die Molybdän- $K\alpha$ -Strahlung. Das dem Zählrohr vorgeschaltete Zirkonfilter schwächt daher die Eiseneigenstrahlung weit stärker als die Molybdänstrahlung.

Durch Kombination von Krypton-Auslösezählrohr und Zirkonfilter erhält man ein für die meisten Fälle ausreichendes Reflexionsdiagramm, wie Bild 5 zeigt. Die Stahlprobe war die gleiche wie bei den Bildern 2 und 4. Die  $(110)\alpha$ - und  $(111)\gamma$ -Reflexe sind in diesem Diagramm nicht registriert, da ihre Intensitäten den eingestellten Meßbereich weit überschreiten. Das wesentlich bessere Intensitätsverhältnis zwischen Linienmaximum und Untergrund ist an der  $(211)\alpha$ -Linie beim Vergleich der Bilder 4 und 5 deutlich zu erkennen.

## 2. Verwendung eines Szintillationszählers, Zirkonfilters und nachgeschalteten Differential-Diskriminators.

Das energetische Auflösungsvermögen eines Szintillationszählers reicht aus, um die charakteristischen Linien von Mo- $K\alpha$  und Fe- $K\alpha$  zu trennen[5]. Mit dem nachgeschalteten Differential-Diskriminator können deshalb die allein interessierenden Impulse der Molybdänstrahlung aus der Gesamtstrahlung ausgefiltert werden. Allerdings wird die der Molybdänstrahlung benachbarte Bremsstrahlung mitregistriert, wobei die kurzwelligere Bremsstrahlung durch das Zirkonfilter schon erheblich geschwächt ist. Bild 6 zeigt das Registrierdiagramm, aufgenommen mit der eben beschriebenen Anordnung an Probe 1. Die Aufnahmedaten sind die gleichen wie bei Bild 5, nur die Aperturblende wurde von 2,4 auf 1,4 mm verkleinert. Der Szintillationszähler ergibt hier eine 70% höhere Intensitätsausbeute; der Untergrund ist bei gleich hohem Linienmaximum niedriger.

Zur Restaustenit-Bestimmung sind folgende Linien geeignet:

$(200)\alpha$  bei  $2\theta = 28^\circ 39'$ ,  $(220)\gamma$  bei  $32^\circ 44'$ ,  $(211)\alpha$  bei  $35^\circ 11'$  und  $(311)\gamma$  bei  $38^\circ 8'$ .

Eine ganz einfache Methode für einen Vergleich der Intensitäten der Martensit- und Austenitlinie ist die folgende:

Die Linienprofile werden aus dem Registrierdiagramm ausgeschnitten, und das Gewicht des Papiers wird für die Gesamtintensität der Linie gesetzt.

Genauer läßt sich die Gesamtintensität durch Auszählen der unter das Linienprofil fallenden Impulse bestimmen. Dazu wurden die während des kontinuierlichen Durchfahrens der Linienlage auffallenden Impulse summiert. Bei einer Winkelgeschwindigkeit des Zählrohrs von  $1/2^\circ$

oder  $1/4^\circ$  je min sind die Impulsraten genügend hoch, um den statistischen Fehler in ertragbaren Grenzen zu halten.

Bei Aufnahmen mit Zirkonfilter der handelsüblichen Dicke von 0,25 mm wird die  $(211)$ -Martensitlinie der  $K\beta$ -Strahlung nicht genügend absorbiert. Diese Linie liegt bei  $2\theta = 31^\circ 21'$  und fällt somit in den Bereich des Untergrundes. Die Impulsraten des Untergrundes fallen dadurch zu hoch aus. Mit einem zweiten Zirkonfilter wird die  $K\beta$ -Strahlung so weit absorbiert, daß sie für die Untergrundbestimmung nicht mehr störend wirkt.

Bei  $2\theta = 31^\circ$  liegt eine starke Karbidlinie, die bei der Untergrundbestimmung nur sehr schwer zu berücksichtigen ist. Daher wurden bei routinemäßigen Untersuchungen, bei denen dieselben Probenformen verwendet werden konnten, als Untergrund die Impulsraten gesetzt, die sich bei einer ausgeglühten Probe im Bereich der sonst vorhandenen  $(220)\gamma$ -Linie ergaben.

Die auf einem der beiden Wege erhaltenen Gesamtintensitäten müssen vor dem Intensitätsvergleich auf Winkelabhängigkeit korrigiert werden [2].

Ist  $V_A$  der Volumenanteil des Austenits,  $V_M$  der des Martensits, so gilt:

$$\frac{V_A}{V_M} = \frac{J_A P_M L_M m_M [S_M F_M e^{-M_M}]^2}{J_M P_A L_A m_A [S_A F_A e^{-M_A}]^2} = \frac{J_A R_M}{J_M R_A} \quad (1)$$

$$\text{mit } \frac{R_M}{R_A} = \frac{P_M L_M m_M [S_M F_M e^{-M_M}]^2}{P_A L_A m_A [S_A F_A e^{-M_A}]^2}$$

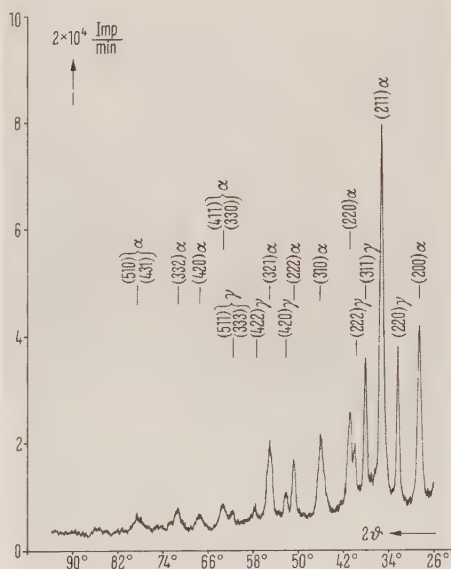


Bild 6 Gleiche Aufnahmedaten wie bei Bild 5, jedoch mit Szintillationszähler und Änderung der Aperturblende von 2,4 mm auf 1,7 mm



Dabei bedeuten

- $J$  Gesamtintensität einer Linie  
 $L \cdot P$  Lorentzfaktor · Polarisationsfaktor  
 $m$  Flächenhäufigkeitszahl  
 $S$  Strukturfaktor  
 $F$  Atomfaktor  
 $e^{-M}$  Temperaturfaktor

Die Werte für die einzelnen Korrekturfaktoren wurden der Tabelle von KLUG und ALEXANDER [6] entnommen.

Der Volumenanteil der Karbidphasen wurde vernachlässigt, also

$$V_A + V_M = 100\% \quad (2)$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) kann somit der Restaustenit bestimmt werden.

$$V_A = \frac{J_A}{J_A + J_M \frac{R_A}{R_M}} 100\%$$

Der Faktor  $\frac{R_A}{R_M}$  hat für die Linien  $(200)\alpha$  und  $(220)\gamma$ , die meistens zu Restaustenitbestimmungen herangezogen werden, den Wert 1,25.

Ein Nachteil des Zählrohrngoniometerverfahrens liegt darin, daß im Gegensatz zum Debye-Scherrer-Filmverfahren ein etwa vorhandener Textureinfluß nicht ohne weiteres erkannt werden kann. Zieht man zum Intensitätsvergleich mehrere Linien heran, so müssen bei Vorliegen einer Textur die Verhältnisse von Martensit- zu Austenitlinie für die verschiedenen Linienpaare stark voneinander abweichen. Die anfangs immer und später an Stichproben durchgeführten Messungen an den Linien  $(200)\gamma$ ,  $(200)\alpha$ ,  $(220)\gamma$ ,  $(211)\alpha$  und  $(311)\gamma$  ergaben bei Restaustenitbestimmungen keinen merkbaren Einfluß einer Textur.

Zur routinemäßigen Bestimmung von Restaustenit wurde das Linienpaar  $(200)\alpha$  bei  $28^\circ 44'$  und  $(220)\gamma$  bei  $32^\circ 22'$  herangezogen. Bild 7 zeigt das Registrierdiagramm dieser beiden Linien für einen Stahl 100 CrMn 6 mit Restaustenitgehalten von a) 13%, b) 7% und c) 2%.

Die Aufnahmen sind alle unter den gleichen Bedingungen gemacht. Die verschiedenen Restaustenitanteile ergaben sich durch zweistündiges Anlassen auf Temperaturen von 200, 240 und 260 °C. Die unterschiedlichen Höhen der  $(200)\alpha$ -Linie kommen teils vom Abbau der inneren Spannungen, teils sind sie darauf zurückzuführen, daß die Martensitphase durch Umwandlung angewachsen ist.

### Eichung

Der Restaustenitgehalt wurde durch Korrektur der gemessenen Intensitäten mit den Tabellenwerten von KLUG und ALEXANDER bestimmt.

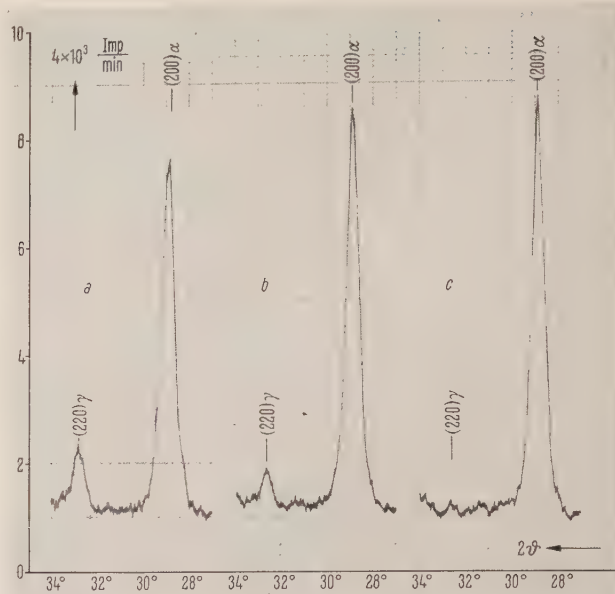


Bild 7 Zählrohrdiagramm eines Stahles 100 CrMn 6 mit Mo-Strahlung, 0,5 mm Zirkonfolie und Szintillationszähler. Aufnahme-daten: 39 kV, 12 mA, Zählrohrblende 0,4 mm, Aperturblende 1,4 mm, Winkelgeschwindigkeit des Zählrohrs  $1/2^\circ$  je min und Dämpfung 7,5 s. Der Restaustenitanteil beträgt bei a) 13%, b) 7% und c) 2%.

Diese Korrekturwerte sind unter idealisierten Bedingungen theoretisch berechnet. Die nach dem obigen Verfahren gemessenen Restaustenitwerte mußten daher mit experimentell gewonnenen Eichwerten verglichen werden. Hierbei ergaben sich folgende Schwierigkeiten: Präparate mit definiertem Restaustenitgehalt lassen sich nicht herstellen. Auch der Vergleich mit anderen Verfahren, die zuverlässige Werte ergeben würden, ist nicht möglich.

Zur Eichung wurden deshalb Gemische von Feilspänen aus Tiefziehbandeisen und austenitischem Stahl verwendet. Es wurden Präparate mit 5%, 10% und 20% Austenit hergestellt, wobei auf gleichmäßige Korngröße und gute Durchmischung des Pulvers geachtet wurde. Jedes Präparat wurde dreimal gemessen. Die Ergebnisse sind in Tafel 1 zusammengefaßt.

Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung der vorgegebenen Werte des Austenitgehaltes mit den gemessenen.

Gemisch mit % Austenit	1. Messung % Austenit	2. Messung % Austenit	3. Messung % Austenit
5	5,4	4,9	5,0
10	10,4	10,6	10,5
20	20,0	19,6	19,7

Tafel 1 Meßergebnisse in künstlich hergestellten Eichpräparaten für die Restaustenitbestimmung

Dieses Verfahren bleibt nicht nur auf die Bestimmung des Restaustenits in gehärteten Stählen beschränkt, sondern kann auch umgekehrt zur Messung des Ferrits in austenitischen Stählen dienen. Überhaupt kann es zur Phasenbestimmung aller Elemente benutzt werden, deren Eigenstrahlung sich mit dem Differentialdiskriminator von der Molybdänstrahlung trennen läßt und deren Phasen keinen komplizierten Atomgitteraufbau haben.

#### Schrifttum

- [1] Tamaru, K. und Sakito, S.: On the Quantitative Determination of Retained Austenite in Quenched Steels. *Sui. Repts. Tohoku Imp. Univ.* **20** (1931) 1
- [2] Averbach, B. L. und Cohen, M.: X-Ray Determination of Retained Austenite by Integrated Intensities. *Transaction AIME* **176** (1948) 401
- [3] Beu, K.: Modification of an X-ray Method for the Measurement of Retained Austenite Concentrations in Hardened Steels. *Transaction AIME* **180** (1952) 1327
- [4] Lindemann, R. und Trost, A.: Das Interferenz-Zählrohr als Hilfsmittel der Feinstruktur-Forschung mit Röntgenstrahlen. *Zeitschrift für Physik* **115** (1940) 456 bis 468
- [5] Neff, H.: Messungen von Röntgenstrahlung mit verbesserten Detektoren und Zählmethoden. *Siemens-Zeitschrift* **33** (1959) 655 bis 660
- [6] Klug, H. P. und Alexander, L. E.: *X-Ray Diffraction Procedure*. John Wiley and Sons, New York 1954

## Bestimmung von Kupfer in Schwefelkies durch Röntgenfluoreszenzanalyse

VON ERNST BRODKORB

Die Bestimmung von Kupfer in Schwefelkies dauert nach dem üblichen elektrolytischen Verfahren (s. z. B. [1]) – Aufschluß des Kiesel und zweimalige Elektrolyse – etwa zwei Tage. Um die Analysedauer abzukürzen, wurde versucht, mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse ein schnelleres Verfahren zur Bestimmung des Kupfers zu finden.

Die ersten Versuche zur direkten Messung der  $\text{Cu-K}\alpha$ -Linie des zu Tabletten gepreßten Kiesel scheiterten an der starken Inhomogenität der Proben. Unter gleichen Bedingungen gepreßte Tabletten des gleichen Kiesel gaben Abweichungen bis zu 5%. Der Grund für diese Abweichungen liegt in der geringen Durchdringungsfähigkeit der Kupfer- $\text{K}\alpha$ -Strahlung. In der Kiestablette wird nur die oberste Schicht erfaßt, entsprechend etwa 0,05 g Substanz. Um ein repräsentatives Mittel der Kiestprobe zu erhalten, ist bei der üblichen Analysefeinheit von 0,1 mm eine Substanzmenge von mindestens 1 g erforderlich, wie sich aus der Statistik der Probenahme ableiten läßt, s. z. B. [2]. Ein weiteres Zerkleinern wäre wegen der Luftempfindlichkeit mancher Kiesel nur mit größerem Aufwand möglich.

Es mußte deshalb ein anderer Weg zur Homogenisierung der Kiesel gefunden werden. Der Aufschluß mit Salpetersäure-Salzsäure oder mit Brom-Salzsäure dauert mehrere Stunden und kam deshalb nicht in Betracht. Durch Schmelzen des Kiesel mit einer Mischung aus Natriumperoxyd, Natriumkarbonat und Kaliumkarbonat, Lösen der Schmelze in Wasser und Ansäuern erhält man eine homogene Lösung des Kiesel. Dabei wird allerdings der Kupfergehalt des Kiesel auf etwa das Hundertfache verdünnt. Um in dieser stark verdünnten Lösung die Intensität der Kupfer-Linie über dem vorhandenen Untergrund mit einem statistischen Fehler kleiner als 0,5% zu messen, wäre eine Meßzeit von etwa einer Stunde erforderlich.

In dem beim Schmelzaufschluß entstehenden Schmelzkuchen ist der Kiesel dagegen nur im Verhältnis von etwa 1:10 verdünnt. Der beim Aufschluß mit Natriumper-

oxyd, Natriumkarbonat und Kaliumkarbonat entstehende Schmelzkuchen ist stark hygroskopisch und darum für die Weiterverarbeitung unbequem. Praktischer ist ein saurer Schmelzaufschluß mit Kaliumpyrosulfat mit einem Zusatz von Natriumchlorat als Oxydationsmittel. In dieser Schmelze löst sich der Kiesel in kurzer Zeit, der Aufschluß kann in einer Quarzgutscheale ausgeführt werden. Ein ähnlicher Aufschluß (Kaliumpyrosulfat und Kaliumpersulfat) wurde von T. J. CULLEN beschrieben [3].

Da die Oberfläche der erkalteten Schmelze nicht genügend eben ist, wurde der Schmelzkuchen vor der Messung pulverisiert und mit einer hydraulischen Presse tablettiert.

Die Messungen wurden mit Nickel als innerem Standard durchgeführt – vor jedem Aufschluß wurde eine konstante Menge Nickeloxyd zugesetzt und in der fertigen Tablette sowohl die Intensität der Kupfer- wie die der Nickel-Linie gemessen.

Durch die Verwendung eines inneren Standards werden eine Reihe von Fehlerquellen bei der Kupferbestimmung ausgeschlossen. Die Wellenlängen der Cu- und der Ni-Strahlung sind sehr ähnlich, deshalb liegen annähernd gleiche Absorptionsbedingungen für beide vor. So werden kleinere Änderungen in der Zusammensetzung der Matrix ausgeglichen, die durch unterschiedliche Zusammensetzung des Kiesel (z. B. verschiedener Fe- oder Pb-Gehalt) oder durch etwas verschiedene Zersetzung des Pyrosulfats oder des Chlorats beim Schmelzaufschluß entstehen können. Ebenso gehen Schwankungen von Luftdruck und Temperatur und Langzeitänderungen der Anregungsstrahlung nicht in das Verhältnis von Cu- zu Ni-Intensität ein. Nach dem Abziehen des Untergrundes ist das Verhältnis von Kupfer zur Nickel-Intensität eine lineare Funktion der Kupferkonzentration im Kiesel.

Zum Aufstellen der Eichkurve wurde ein kupferfreier Schwefelkiesel gemeinsam mit bekannten Mengen Kupferoxyd aufgeschlossen.



Bild 1 zeigt die erhaltenen Meßpunkte für den Bereich von 0 bis 5% Kupfer im Kies.

Durch Ausgleichsrechnung wurde aus diesen Werten folgende Eichkurve gefunden:

$$\% \text{ Cu} = 1,083 \frac{I_{\text{Cu}}}{I_{\text{Ni}}} - 0,036$$

Tafel 1 enthält die Kupferwerte für 21 Schwefelkiese im Vergleich zu den elektrolytisch erhaltenen Werten.

Nr.	% Cu elektrolytisch	% Cu Röntgenfluoreszenzanalyse	Korrigiert für Ni-Gehalt	Differenz
1	2,31	2,37		+ 0,06
2	0,77	0,75		— 0,02
3	0,25	0,23		— 0,02
4	1,12	1,14		+ 0,02
5	2,19	2,18		— 0,01
6	3,15	3,15		0
7	1,37	1,35		— 0,02
8	3,08	3,08		0
9	1,85	1,84		— 0,01
10	2,39	2,36		— 0,03
11	0,84	0,85		+ 0,01
12	1,02	1,03		+ 0,01
13	3,08	3,06		— 0,02
14	0,23	0,22		— 0,01
15	1,89	1,88		— 0,01
16	0,48	0,44		— 0,04
17	1,06	1,08		+ 0,02
18	2,20	2,21		+ 0,01
19	1,20	1,21		+ 0,01
20	3,24	3,19		— 0,05
21	0,41	0,36	0,42	+ 0,01

Tafel 1 Kupferwerte für 21 Schwefelkiese im Vergleich zu den elektrolytisch erhaltenen Werten

Die Standardabweichung bei der röntgenfluoreszenzanalytischen Kupferbestimmung beträgt 0,02% Cu, für die elektrolytische Kupferbestimmung wurden ebenfalls 0,02% Cu berechnet (beide Werte aus je 20 Parallelbestimmungen ermittelt).

Ein Gehalt an Nickel (> 0,01%) in dem zu bestimmen den Kies verfälscht allerdings das Analysenergebnis. Durch Erhöhung der Konzentration an innerem Standard wird ein zu niedriger Kupfergehalt vorgetäuscht. Diese Störung kann leicht korrigiert werden, indem man

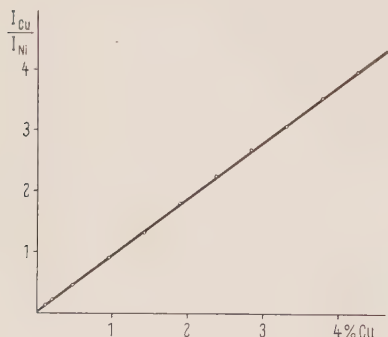


Bild 1  
Eichkurve für  
die Kupfer-  
bestimmung

die Intensität der Nickel-Linie im ursprünglichen Kies mißt. Mit einer Meßzeit von 1 Minute erhält man den Nickelgehalt des Kiesel mit einer für die Korrektur ausreichenden Genauigkeit.

Von den untersuchten Kiesen enthielt nur Nr. 21 0,06% Nickel. Die vierte Spalte der Tabelle enthält den für Nickel korrigierten Kupferwert.

Der reine Arbeitsaufwand für eine derartige Bestimmung beträgt etwa eine Stunde und ist gleich dem bei der elektrolytischen Kupferbestimmung, dagegen liegt das Ergebnis bei der Röntgenfluoreszenzanalyse schon nach dieser einen Stunde vor, während man bei der elektrolytischen Bestimmung wegen der langen Standzeiten etwa zwei Tage darauf warten muß.

### Arbeitsvorschrift

**Probenvorbereitung:** 1 g Kies, 50 mg Nickeloxyd ( $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) und 12 g Aufschlußmischung (80 Gew.-%  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$  und 20 Gew.-%  $\text{Na Cl O}_3$ ) wurden in einer Quarzgutschale gut gemischt. Unter häufigem Umschwenken wurde die Schale über einer Bunsenflamme innerhalb von 10 Minuten bis auf etwa 600 °C erhitzt, dabei wurde die Schmelze homogen. Nach dem Erkalten wurde der Schmelzkuchen in einer Kugelmühle pulverisiert, durch ein 0,075-mm-Sieb abgesiebt und in einer hydraulischen Presse mit einer Kraft von 8000 kp im Vakuum zu einer Tablette von 25 mm Durchmesser gepreßt.

**Messung:** Für die Messungen wurde der KRISTALLO-FLEX 4 mit Fluoreszenzzusatz 4b verwendet. Zur Anregung der Fluoreszenzstrahlung diente die Wolfram-Hochleistungsröhre, belastet mit 45 kV und 40 mA. Gemessen wurden die Linien

$\text{Cu-K}_\alpha$  bei 45° 0' (LiF-Kristall), Meßzeit 4 Minuten und  $\text{Ni-K}_\alpha$  bei 48° 38', Meßzeit 1 Minute

sowohl auf der Vorder- wie auf der Rückseite der Tablette mit einem Szintillationszähler (Sollerspalt 0,4°). Die Betriebsbedingungen von Szintillationszähler und Diskriminator des Strahlungsmeßgeräts wurden so gewählt, daß alle von Cu- und Ni-Strahlung erzeugten Impulse durchkamen.

**Auswertung:** Zur Auswertung wurden die in der angegebenen Meßzeit erhaltenen Impulse für Vorder- und Rückseite der Tablette addiert. Nach dem Subtrahieren des Untergrundes, der durch Messung einer Tablette aus kupferfreiem Kies ohne Nickelzusatz erhalten wurde, wurde die Kupferstrahlung auf eine Kieselwaage von 1,000 g und die Nickelstrahlung auf eine Nickeloxydwaage von 0,0500 g korrigiert und das Verhältnis von Kupfer- zu Nickel-Intensität gebildet. Für das korrigierte Cu-Ni-Verhältnis Q gilt somit

$$Q = \frac{B (\text{Impulszahl}_{\text{Cu}} - \text{Untergrund}_{\text{Cu}})}{0,05 A (\text{Impulszahl}_{\text{Ni}} - \text{Untergrund}_{\text{Ni}})}$$

(A Kieselwaage in g, B Nickeloxydwaage in g) Dieser Wert wurde in die Gleichung der Eichkurve ein-

gesetzt und man erhielt daraus den Kupfergehalt des Kiesel  $p$  in % zu:

$$p = 1,083 Q - 0,036$$

Korrektur für Nickelgehalt: Um einen etwaigen Nickelgehalt des Kiesel zu berücksichtigen, wurde im Kies (ohne Aufschluß) die Intensität der Nickel-Linie bestimmt. In dem zu einer Tablette gepreßten Kies wurde mit der gleichen Einstellung wie bereits angegeben die  $Ni-K_{\alpha}$ -Linie 1 Minute lang gemessen. Wurden hier-

bei mehr als 10000 Impulse erhalten, so wurden zu dem aus der Eichkurve errechneten Kupfergehalt

$$p \cdot \frac{\text{Impulzzahl}_{Ni} - 9000}{86000}$$

addiert.

#### Schrifttum

- [1] Chemiker-Fachauschuß der Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute e.V.: Analyse der Metalle, Band 1. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1949, S. 200
- [2] P. Gy, Erzmetall 8 (1955) 199
- [3] T. J. Cullen, Analyt. Chem. 32 (1960) 516

## TECHNISCHE BERICHTE

### Ofentransformatoren für Karbidöfen hoher Leistung

VON ALFONS SAUER

Der steigende Bedarf der chemischen Industrie an Calcium-Karbid, einem Schlüsselprodukt der Kunststoff-Chemie, hat zu immer größeren und wirtschaftlicheren Ofeneinheiten geführt. Im selben Maße sind aber auch die Anforderungen an die Ofentransformatoren gestiegen.

Besondere Probleme wirft die Energieversorgung des sogenannten Rechteckofens auf, dessen Elektroden nebeneinander angeordnet sind. Die dem Betriebsmann unter dem Begriff »scharfe« und »tote« Phase bekannte Erscheinung einer hohen Stromunsymmetrie in den drei Elektroden muß durch getrennte Einstellung der Leiterspannung am Ofentransformator so gut wie möglich ausgeglichen werden können.

Von dem hier beschriebenen Ofentransformatorenaggregat (s. Bild) haben die Siemens-Schuckertwerke bereits sieben Einheiten an chemische Großbetriebe in der UdSSR und in Mitteldeutschland geliefert.

Es war verlangt worden, daß ein Ofen mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 60 MVA über einen Ofentransformator, dessen Sekundärspannung unter Last von 290 bis 130 V einstellbar ist, unmittelbar an die Netzspannung von 110 kV angeschlossen werden kann. Im angegebenen Einstellbereich soll der Sekundärstrom von 120 kA je Leiter konstant bleiben, d. h., die Leistung soll proportional zur Unterspannung sinken. Außerdem muß die Sekundärspannung in jedem Leiter getrennt eingestellt werden können, und zwar bis zu einer maximalen Differenz von 100 V zwischen höchster und niedrigster Spannung zweier Leiter.

Bei der Wahl der Oberspannung kamen zunächst 30 und 110 kV in Betracht. Die Entscheidung zugunsten der höheren Spannung fiel u. a. aus folgenden Gründen: Bei Anschluß an 110 kV sind die Netzrückwirkungen des Ofenbetriebes wegen der höheren Netzleistung geringer. Außerdem konnte der Leistungstransformator für die Übersetzung auf die Zwischenspannung einspart werden, da das vorhandene 30-kV-Netz leistungsmäßig nicht mehr ausgereicht hätte. Damit war eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage verbunden.

Die gestellten Forderungen führten zwangsläufig zur Wahl eines Drehstromtransformators mit Spannungseinstellung im Zwischenkreis<sup>1)</sup> und sekundärer Sternschaltung. Sekundäre Dreieckschaltung bei gleichzeitig verlangter primärer Dreieckschaltung ermöglicht keine getrennte Einstellung der Leiterspannung, weil sich

bei der durch das Netz aufgezwungenen Vektorlage das sekundäre Dreieck nicht mehr schließen würde. Wegen der dann auftretenden großen Ausgleichströme ist es nicht mehr möglich, die Leiterspannungen getrennt einzustellen. Die unmittelbare Spannungseinstellung durch Zu- und Abschalten von Windungen in der Oberspannungswicklung ist wegen der hohen Anschlußspannung (110 kV) und des großen Einstellbereiches nicht durchführbar. Bei Verwendung von drei Einphasentransformatoren anstelle des Drehstromtransformators müßte der sekundäre Sternpunkt für 120 kA mit Rücksicht auf die starken Quersfelder verhältnismäßig weit von den Transformatoren entfernt – gegebenenfalls sogar am Ofen – gebildet werden, so daß dann sechs Hochstromleitungen für 120 kA verlegt werden müßten; dies ist aber unwirtschaftlich und verursacht außerdem hohe Kupferverluste.

Als Besonderheit der Zwischenkreisregelung<sup>1)</sup> ist für den vorliegenden Fall zu erwähnen, daß der Stufentransformator in Sparschaltung in einem getrennten Kessel untergebracht ist. Dadurch erhält der eigentliche Ofentransformator – bestehend aus einem Haupt- und einem Zusatztransformator in gemeinsamem Kessel – einen einfachen und robusten Aufbau. Bei Ausfall des Stufentransformators, der wegen einer Vielzahl von bewegten und daher dem Verschleiß unterliegenden Teilen einer aufmerksameren Wartung bedarf, kann der Ofen mit dem Haupt- und dem Zusatztransformator allein betrieben werden, allerdings nur mit 290, 210 und 130 V. Somit verbilligt sich die Reservehaltung dadurch, daß gegebenenfalls nur für den Stufentransformator Ersatz vorhanden sein muß.

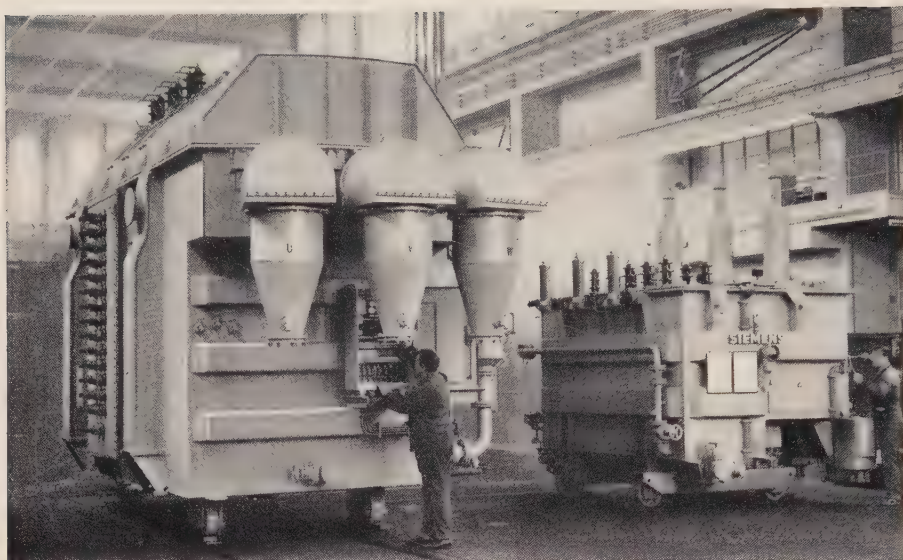
Der Strom im Zwischenkreis ist stets proportional dem Sekundärstrom. Durch Einschalten von Stromwandlern in den Zwischenkreis kann daher der hohe Ofenstrom bequem gemessen werden. Hier entspricht z. B. einem Ofenstrom von 120 kA ein Zwischenkreisstrom von 523 A. Die Zwischenkreisspannung beträgt 10 550 V.

Mit Hilfe eines eingebauten, handbetätigten Umstellers kann die Oberspannungswicklung wahlweise in Dreieck oder in Stern geschaltet werden. Bei Sternschaltung erhält man einen weiteren Spannungsbereich von 167,5 bis 75 V für das Anfahren des Ofens.

Der Haupttransformator ist für das unmittelbare Einführen von 110-kV-Einleiter-Ölkabeln eingerichtet. In die Kabeleinführungskästen sind Ringstromwandler zur Messung des Primärstromes eingebaut.

1) Rosenthal, W.: Ofentransformatoren. Siemens-Zeitschrift 34 (1961) 96 bis 104





60-MVA-Drehstrom-Ofentransformator (links) mit getrenntem Stufentransformator in Sparschaltung (rechts) für 110 kV Netzspannung. Die Sekundärspannung kann zwischen 290 und 130 V bei 120 kA eingestellt werden

Auf der Sekundärseite wird der Ofenstrom (120 kA) durch 14 wassergekühlte Kupferrohre je Leiter weggeführt. Die Rohrkrümmer sind an die Unterspannungswicklung biegsam angeschlossen und werden an einer der Seitenwände des Transformators öldicht und isoliert durch eine Aluminiumplatte hindurchgeführt. Der sekundäre Sternpunkt ist zu zwei weiteren Kupferrohren herausgeführt und kann, beispielsweise durch eine elektrische Absticheinrichtung, mit 10 kA belastet werden.

Für die Eisenkerne wurden kaltgewalzte Bleche mit geringen Verlusten verwendet. Der Haupt- und der Zusatztransformator haben Fünfschenkelkerne – den einen wegen der geringeren Bauhöhe, den anderen zur Bildung eines magnetischen Rückschlusses bei unsymmetrischer Erregung durch getrennte Einstellung der Leiter-spannung.

Auch im vorliegenden Fall wurde die bei Ofentransformatoren bevorzugte Ölumlauf-Wasserkühlung verwendet. Der übrige konstruktive Aufbau gleicht im wesentlichen normalen Netztransformatoren. Das gleiche gilt für die verschiedenen Schutz- und Überwachungseinrichtungen.

Die mit den beschriebenen Ofentransformatoren ausgerüsteten Öfen sind wahrscheinlich noch nicht das Maximum des technisch Möglichen. Es deutet vieles darauf hin, daß die Ofenleistungen noch weiter steigen werden. Die Siemens-Schuckertwerke haben sich auf diese Entwicklung bereits eingestellt.

### Erfahrungen mit Dehnungsmeßstreifen-Manometern an großen, fünfstufigen Kolbenkompressoren

VON PETER KRÜTZFELDT

Eine Gaskompressoranlage mit vier Einheiten sollte im Zuge der Betriebsrationalisierung auf zentrale Überwachung und Steuerung umgestellt werden. Als wichtige Voraussetzung für eine betriebsgerechte Lösung dieser Aufgabe mußte eine zuverlässige Fernmessung sämtlicher Druckstufen der vier Einheiten sichergestellt werden. Es kamen deshalb nur elektrische Meßverfahren in Betracht. Geeignete Meßwertgeber sollten jeweils parallel zu den bisherigen Rohrfederdruckmessern in unmittelbarer Nähe der Maschinen eingebaut und wie diese über die bestehenden, mit einer geeigneten Trennflüssigkeit gefüllten Leitungssysteme an den jeweils zugehörigen Druckraum angeschlossen werden.

Aus dieser Betriebsweise ergibt sich eine wichtige Bedingung für die Meßwertdarstellung. Da in diesen Leitungssystemen von Zeit zu Zeit Verstopfungen auftreten, wird zur rechtzeitigen Feststellung einer derartigen Störung die gut ablesbare und gedämpfte Anzeige des dem statischen Druck überlagerten dynamischen Verlaufs der Gaskompression notwendig.

Diese Ablesemöglichkeit ist für den Druck der Endstufen ganz besonders wichtig, da von der zuverlässigen Messung und Einhaltung der oberen Druckgrenze die Betriebssicherheit der Anlage unmittelbar abhängt. Daher sollte dieser Enddruck nicht nur registriert, sondern über einen weiteren Meßwertgeber mit eigener Meßschaltung gemessen und auf einem Anzeigeinstrument mit elektronischem Grenzwertmelder angezeigt und überwacht werden.

### Aufbau der elektrischen Druckmeßanlage

Diese Aufgaben und Forderungen konnten in vorteilhafter Weise mit Dehnungsmeßstreifen-Manometern als Meßwertgeber erfüllt werden, mit denen für die einzelnen Einheiten jeweils die im Bild 1 dargestellte elektrische Druckmeßanlage installiert wurde.

An jeder Maschine sind sechs DMS-Geber angebaut: drei für 50 kp/cm<sup>2</sup> und drei für 200 kp/cm<sup>2</sup> Nenndruck. Zur vollen Ausnutzung der Genauigkeit der Dehnungsmeßstreifen-Manometer wurde an jeder Kompressoreinheit ein KOMPENSOGRAF\*-Punktdrucker eingesetzt. Die Meßbereiche wurden so gewählt, daß die fünf Stufen der Reihe nach nebeneinander gedruckt werden. Punktfolge und Vorschub des KOMPENSOGRAF entsprechen der Forderung, die dynamische Schwingbreite so deutlich abzubilden, daß Verstopfungen vor den Dosen an der allmählichen Einengung des jeweiligen Punktbandes rechtzeitig erkennbar sind. Eine Streuung der Punktbänder von bestimmter Breite ergibt sich dadurch, daß der Punktdrucker beim Abtasten der Meßstellen nach statistischen Gesetzen jeweils nur Augenblickswerte des infolge der Kompressionsstöße dynamisch um einen Mittelwert schwankenden Druckverlaufes abdrucken kann.

Je Einheit können die Dehnungsmeßstreifen-Manometer sämtlicher Stufen zusätzlich wahlweise auf ein direktanzeigendes Schalttafel-Lichtmarkengalvanometer getestet werden. In diesem Fall wird allerdings die Anzeige des Meßwertes nicht im Kompensations-, sondern im Ausschlagverfahren vorgenommen. Dieses Lichtmarkengalvanometer, das in Ruhestellung der Tasten dauernd im Meßkreis des Sicherheitsmanometers liegt, ist gemeinsam mit den In-

\* Eingetragenes Warenzeichen

strumenten für die anderen Einheiten auf dem Steuerpult angeordnet, so daß auch von dieser Stelle aus eine direkte Überwachung aller Meßpunkte jederzeit möglich ist (Bild 2).

Die Dehnungsmeßstreifen-Manometer sind in unmittelbarer Nähe der Maschine eingebaut. Sie wurden an die Kabel mit Klemmverbindungen angeschlossen, die gegenüber Steckverbindungen größere Kriechwege und reichlicheren Anschlußraum bieten (Bild 3). Die Entfernung zwischen Meßort und Warte beträgt durchweg 50 m. Deshalb sind besondere Maßnahmen zur Verringerung des Leitungseinflusses vorgesehen, und zwar ein wesentlich erhöhter Leitungsquerschnitt und eine weitgehend temperaturunabhängige, besonders hochwertige Aderisolation.

Die ersten Erfahrungen mit normalen Kunststoff-Leitungen ließen, allerdings bei etwa 40 °C Raumtemperatur, gewisse Schwierigkeiten erkennen. Die Isolationswerte des zunächst verwendeten Kunststoffes sinken nämlich bei diesen Temperaturen mindestens um eine Größenordnung unter die hier zu fordernden Werte. Es traten zeitweise völlig unerklärliche Einstell- und Nullpunktfehler auf.

Nach längeren Versuchen konnte die Ursache in der stark temperaturabhängigen Isolationswerten der Meßleitung nachgewiesen werden. Unter gleichen Bedingungen wurden daraufhin Leitungen mit Polyäthylen-Isolierung verlegt. Damit waren die Leitungsschwierigkeiten behoben.

Die örtlichen Betriebsverhältnisse (Korrosion, Temperatur, Beschädigungsgefahr) ließen auf keinen Fall die Aufstellung von Anschlußrelais- oder Verstärkereinrichtungen im Betriebsraum zu. Daher wurden die gesamten Meßeinrichtungen in der gut belüfteten Warte hinter der Schalttafel in Gußkästen des UG-Systems mit Schnellverschlußdeckeln übersichtlich untergebracht (Bild 4). Besonderer Wert wurde auch hier auf ausreichenden Klemmenraum und einfache Verdrahtungsmöglichkeit gelegt. Die ankommenden Meßleitungen wurden sorgfältig auf hochwertig isolierte Klemmenleisten aufgelötet. Das Anzeigegerät mit dem Grenzwertmelder für das Sicherheitsmanometer wurde ebenfalls hinter der Schalttafel angeordnet und ist unmittelbar mit der Meßschaltung zusammengebaut.

### Betriebserfahrungen

Die ungewöhnlich hohen Raumtemperaturen brachten nicht nur Schwierigkeiten bezüglich des Einhaltens der erforderlichen Isolationswerte mit sich. Auch chemische Einwirkungen auf die Tasterkontakte für die Manometerumschaltung in das Ausschlagverfahren waren, begünstigt durch diese Temperaturen, so groß, daß die Kontakte bereits nach kurzer Zeit stark oxydierten und die Messung unsicher oder ungenau wurde. Die Kontaktdrücke der Tasten und damit die Selbstreinigung der Kontakte waren unter diesen Umständen bei der äußerst niedrigen Spannung unzureichend. Es wurde daher auf eine Relaischaltung überge-

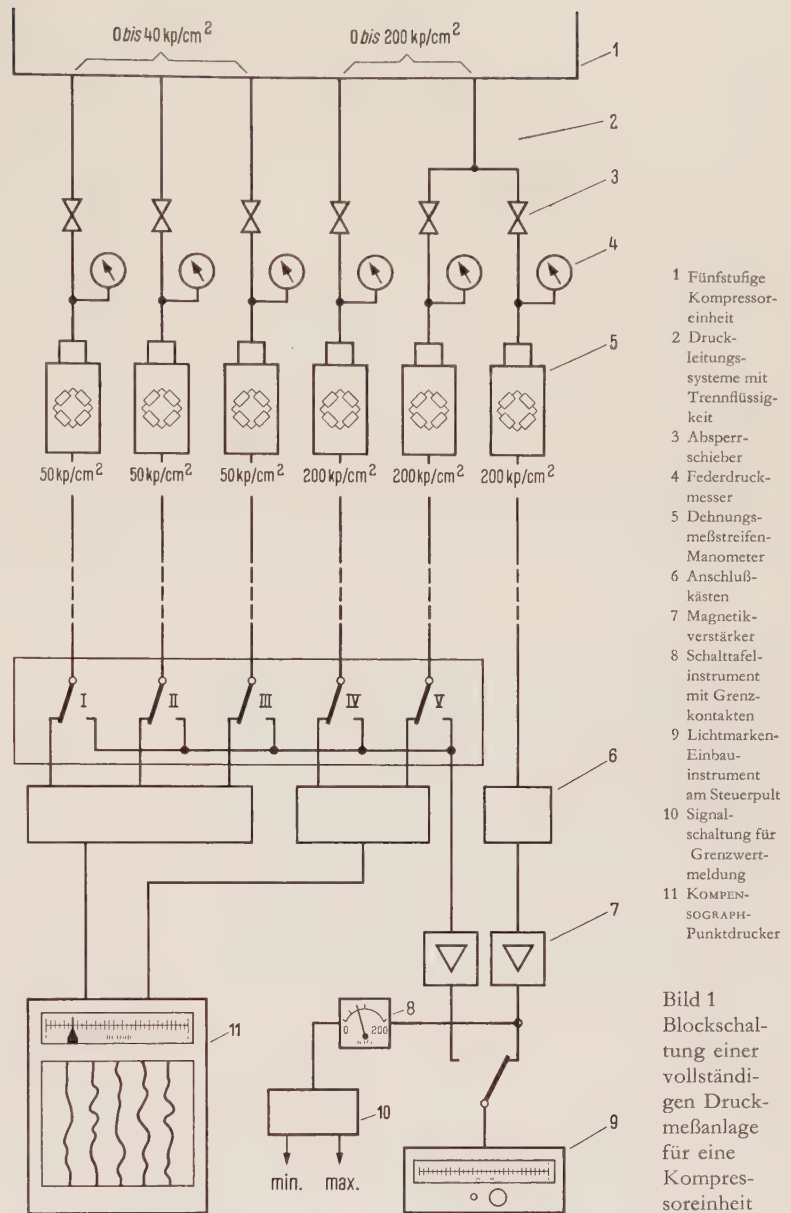


Bild 1  
Blockschaltung einer vollständigen Druckmeßanlage für eine Kompressoreinheit

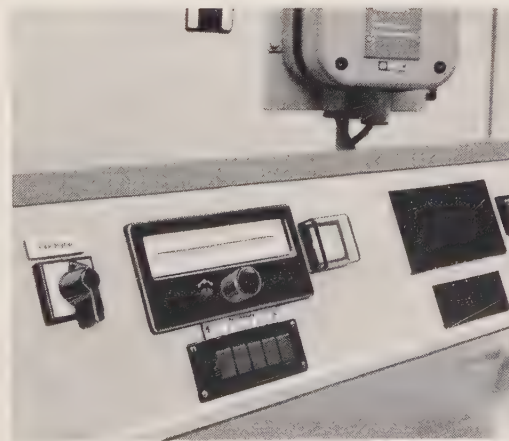


Bild 2 Ausschnitt aus dem Steuerpult einer Druckmeßanlage mit Lichtmarken-Einbauinstrument und Taster zum Anwählen der fünf Druckstufen einer Einheit



gangen; die gekapselten Relais sind mit Goldkontakten bestückt und in einem Gußkasten in der Warte hinter der Schalttafel untergebracht. In dieser Betriebsweise arbeitet die Schaltung einwandfrei.

Nachdem diese Schwierigkeiten, die sich überwiegend aus den besonderen Bedingungen eines chemischen Großbetriebes ergaben, beseitigt waren, kann zu der Arbeitsweise der Druckmeßanlage folgendes gesagt werden:

Die Dehnungsmeßstreifen-Manometer arbeiten nunmehr in über zweijährigem Dauerbetrieb, in dem sie bis heute etwa  $10^8$  dem Betriebsdruck überlagerte dynamische Stöße auszuhalten hatten, mit gleichbleibender Genauigkeit und Nullpunktsicherheit. Dabei betragen die dynamischen Werte bis zu 15% des mittleren Betriebsdruckes. Diese elektrische Fernmessung brachte dem Betrieb nicht nur eine höhere Genauigkeit, sondern auch die echte Zentralsteuerung unter Verringerung des Bedarfes an Maschinenpersonal. Die klare Darstellung der Druckschwingungen und die zuverlässige Überwachung der Druckgrenze lassen eine erhöhte betriebliche Ausnutzung der Anlage zu. Schließlich haben DMS-Manometer außer ihrer großen Meßgenauigkeit und den vielseitigen Möglichkeiten der Meßwertverarbeitung, die sie bieten, auch bei dynamischer Dauerbeanspruchung im Vergleich zu Federdruckmessern eine sehr hohe Lebensdauer.

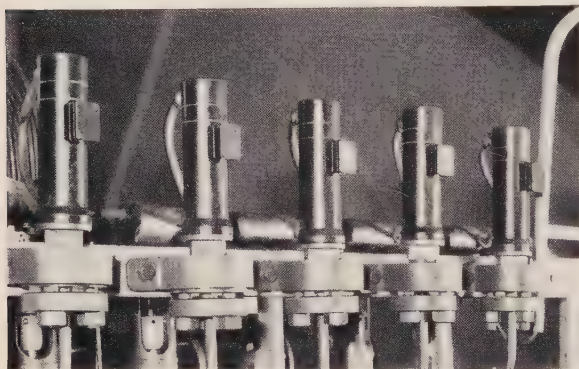
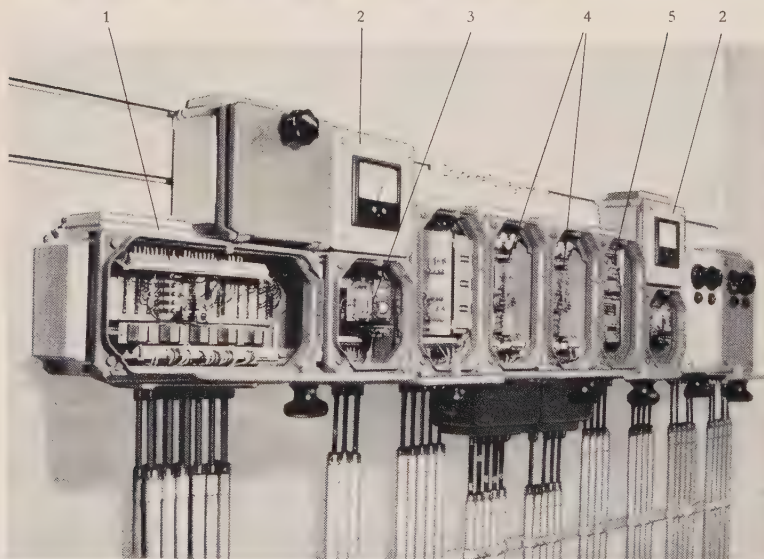


Bild 3 Anbau von Dehnungsmeßstreifen-Manometern an einem fünfstufigen Kompressor



- 1 Anschlußkasten mit Relaissteuerung zum Umschalten der Meßkreise
- 2 Schalttafelinstrument mit Grenzwertmelder
- 3 Signalschaltung für Grenzwertmeldung
- 4 Meßschaltung für Ausschlagverfahren und Spannungskonstanthalter
- 5 Magnetikverstärker mit Konstanthalter

Bild 4 Anordnung der Meßeinrichtungen in der Warte hinter der Schalttafel (Deckel der Gußgehäuse abgenommen)

## Synchron-Kompressorantriebe mit extrem niedrigen Rückwirkungen auf das Netz

VON HELMUT FISCHER UND ARMIN KÄPPNER

Bei der Planung von elektrischen Antrieben für große Schubkolbenverdichter ist meistens zu überlegen, welche Rückwirkungen auf das speisende Netz beim Einschalten und während des Betriebes zu erwarten sind. Die Anlaufströme von Asynchronmotoren mit Käfigläufer und von selbstanlaufenden Synchronmaschinen, die überwiegend für solche Antriebe eingesetzt werden, können beträchtliche Spannungsabsenkungen an den Sammelschienen zur Folge haben. Außerdem führen die Schwankungen bei der Stromaufnahme, hervorgerufen durch die mit dem Kolbenhub des Kompressors sich ändernden Lastmomente, möglicherweise zu störenden periodischen Spannungsschwankungen.

### Aufgabe

Ein neu zu errichtendes chemisches Werk mit verhältnismäßig großen Verdichtereinheiten sollte über eine 11 km lange 20-kV-Freileitung mit elektrischer Energie versorgt werden. Wegen eines über dieselbe Freileitung versorgten Wohnbezirkes mit Beleuchtungs- und Fernsehgeräten stellte das zuständige Energie-Versorgungs-Unternehmen hinsichtlich der Netzzrückwirkungen über das übliche Maß hinausgehende Forderungen.

Die Spannung an der 20-kV-Sammelschiene des Werkes sollte beim Anlauf eines Antriebs um nicht mehr als 2% sinken. Aufgrund der Transformator- und Leitungswiderstände der Einspeisung ergab sich damit, daß die Einschaltleistung bei einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi \approx 0,2$  zwischen 1100 und 1300 kVA gehalten werden muß. Für die im ersten Ausbau vorgesehenen zwei Synchron-Kompressormotoren mit je 900 kW, 6 kV bei  $\cos \varphi = 0,95$  und 167 U/min (Bild 1) bedeutete dies eine Begrenzung des Anlaufstromes auf den 1,1- bis 1,3fachen Wert des Nennstromes.

Als Richtlinie für die maximal zulässigen periodischen Spannungsschwankungen war die Störschwellenkurve<sup>1)</sup> zugrunde zu legen. Für die der Antriebsdrehzahl entsprechenden Frequenz von 2,78 Hz durfte hiernach die relative Höhe der Spannungsschwankung 0,5% nicht überschreiten. Zur Sicherheit sollte ein Wert von 0,4% angestrebt werden.

Unter Berücksichtigung der Leitungsdaten ergab sich hieraus die Forderung, daß – auch unter der Annahme eines Gesamtleistungsfaktors von  $\cos \varphi \approx 1,0$  – der Betrag der periodischen Stromänderung ( $I_{\max} - I_{\min}$ ) auf der 20-kV-Seite kleiner als 13,3 A sein mußte.

### Ausführung

Von den verschiedenen Möglichkeiten, den Anlaufstrom von Synchronmotoren herabzusetzen, wurde der Teilspannungsanlauf gewählt. Bei diesem Verfahren gehen der Motorstrom proportional, der auf das Netz bezogene Anlaufstrom und auch das asynchrone Motoranlaufmoment etwa im quadratischen Verhältnis mit der Teilspannung zurück. Bei dem verwendeten Transformator geschieht das unterbrechungslose Umschalten von der Teilspannung

1) Ringbuch der Energiewirtschaft 7.57



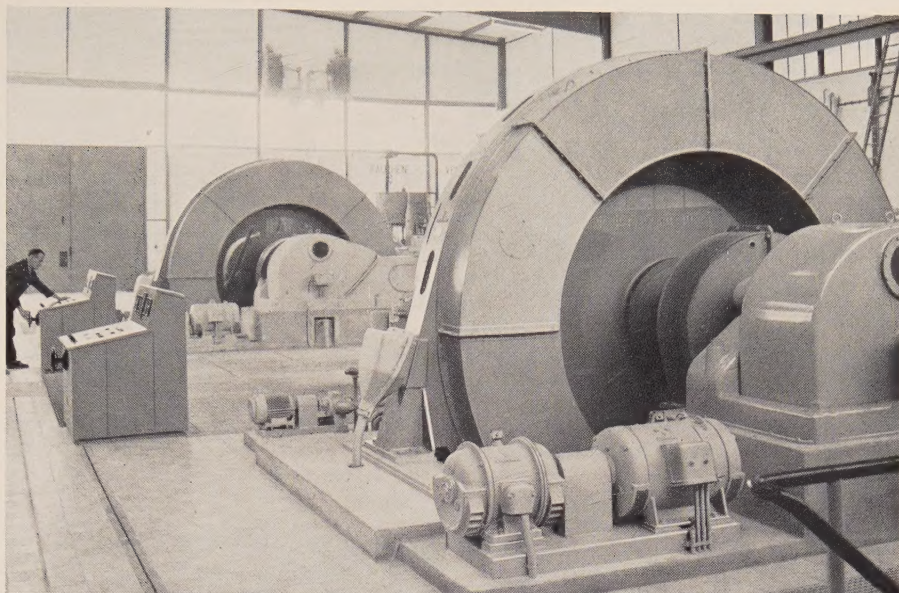


Bild 1 Synchron-Kompressor-  
motoren 900 kW, 6 kV, 167 U/min  
mit Steuerzubehör

auf die volle Motorspannung über Widerstände. Diese Ausführung zeichnet sich im Vergleich zum Dreischalterverfahren durch besonders niedrige Magnetisierungsströme aus. Der motorisch angetriebene Umschalter ist unmittelbar auf dem Transformatorkessel aufgebaut. Es wurden Anzapfungen für 55, 60 und 65 % vorgesehen. Besondere Maßnahmen zur Entlastung auf der Kompressorseite ließen ein Losbrech- und Anlaufgegenmoment von etwa 20 % des mittleren Lastmomentes erwarten.

Die Ungleichförmigkeit der Drehbewegung und die Stromschwankungen bei Kolbenkompressorantrieben können durch große Schwungmomente weitgehend ausgeglichen werden. Da sich zusätzliche Schwungmassen am leichtesten am Motorläufer anbringen lassen, wurde jede der beiden Synchronmaschinen mit einem Gesamtschwungmoment von 50 tm<sup>2</sup> ausgeführt. Mit diesem Wert, der mit Rücksicht auf die Belastung der Lager und die zusätzliche Beschleunigungsarbeit beim Anlauf noch ausführbar war, ergab die Vorausberechnung unter Zugrundelegung des Tangentialdruckdiagrammes Stromschwankungen von etwa  $\pm 23\%$  bzw.  $\pm 6,5$  A je Antrieb. Es mußte also damit gerechnet werden, daß der Absolutbetrag der Stromdifferenz bei Betrieb beider Aggregate mit ungünstiger Kurbelstellung den zulässigen Wert von 13,3 A erheblich überschreiten würde. Andererseits war zu erwarten, daß sich bei günstiger Kurbellage die Stromschwankungen weitgehend ausgleichen würden.

Es gibt verschiedene Verfahren, Synchronmotoren in vorgegebene Polradwinkel einzusteuern. Dabei wird im allgemeinen zunächst auf eine beliebige Stellung hochgefahren und anschließend um die erforderliche Anzahl Polteilungen geschlüpft. Der Grund für diese Verfahrensweise liegt darin, daß Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen infolge des Reaktionsmomentes meistens schon vor dem Einschalten der Erregung in den Synchronismus gehen. Eine gezielte Erregungsaufschaltung beim Anlauf bliebe dann ohne den gewünschten Erfolg. Wegen der beim Schlupfvorgang mit voller Ständerspannung auftretenden hohen Ständerströme wäre ein solches Vorgehen im vorliegenden Fall jedoch verfehlt. Mit einem Anlaßtransformator zur Verminderung der Einschaltbeanspruchung bot sich hier eine Möglichkeit, den Motor bereits beim Anlauf in eine vorgegebene Polradstellung einzusteuern. Mit der Spannung am Motor sinkt nämlich auch das Reaktionsmoment. Solange der Motor mit Teilspannung läuft, ist also ein Synchronisieren durch das Reaktionsmoment nicht zu erwarten.

Die Anlaufautomatik wurde deshalb so eingerichtet, daß der Befehl zum Überbrücken des Erregerwiderstandes abhängig vom Polradwinkel bereits gegeben wird, solange der Motor noch mit kleinem Schlupf unter Teilspannung läuft.

Zum Messen des relativen Polradwinkels zwischen beiden Maschinen wurde die bekannte Winkelmeßeinrichtung mit Drehmeldern verwendet. Der zur Anzeige dienende Differenzdrehmelder erhielt eine einstellbare Kontakteinrichtung zur Vorwahl des einzusteuern den Polradwinkels.

#### Meßergebnisse

Durch oszillographische Messungen konnte nachgewiesen werden, daß die für einen 900-kW-Synchronmotor außerordentlich niedrige Anlaufscheinleistung von 1200 kVA erreicht wurde. Dieser Wert schließt die Magnetisierungsleistung des vorgeschalteten Blocktransformators 20/6 kV ein. Der Anlaßtransformator war hierbei auf die mittlere Anzapfung geschaltet. Die Leistungsaufnahme beim Umschalten auf die volle Motorspannung lag weit unter dem Einschaltwert.

Die Schwankungen in der Stromaufnahme eines Antriebs waren wesentlich niedriger, als sie nach dem gegebenen Tangentialdruckdiagramm ermittelt worden waren. Der Unterschied in der Stromaufnahme bei Vollast während einer Umdrehung betrug

$$I_{\max} - I_{\min} = 33,5 \text{ A} - 25 \text{ A} = 8,5 \text{ A}$$

Bei Betrieb beider Maschinen mit einer Polradversetzung von 0° betrug die größte Stromänderung 13 A, wobei der eine Motor mit 900 kW, der zweite aus betrieblichen Gründen allerdings nur mit 680 kW belastet werden konnte (Bild 2). Unter gleichen Belastungsverhältnissen, jedoch bei einer Polradversetzung von 180°, wurden Stromdifferenzen von nur 6,6 A gemessen (Bild 3). Mit diesem Wert müssen sich Spannungsschwankungen ergeben, die unterhalb der Schwelle des Wahrnehmbaren liegen. Auf eine Messung der Spannungsschwankungen wurde deshalb verzichtet.

Die Vorgänge beim Anlauf und Einsteuern eines Motors können am Oszillogramm (Bild 4) abgelesen werden. In der Zeit zwischen A und B ist der Motor vom Stillstand bis nahe an die Synchrondrehzahl hochgelaufen. Zwischen B und C schlüpft der Läufer jeweils um einen Pol langsam weiter. Bei C ist der vorgegebene



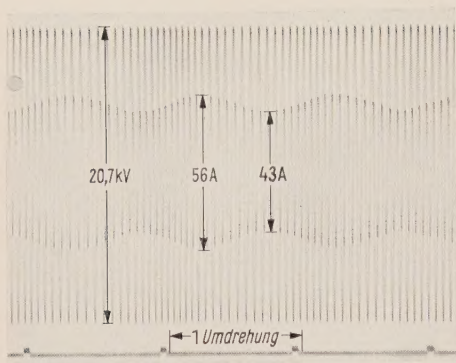


Bild 2 Stromschwankungen beim Betrieb von zwei Motoren mit 100% und 75% Nennlast. Polradversetzung  $0^\circ$

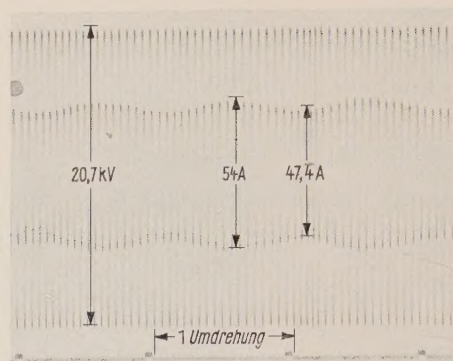


Bild 3 Stromschwankungen beim Betrieb von zwei Motoren mit 100% und 75% Nennlast. Polradversetzung  $180^\circ$

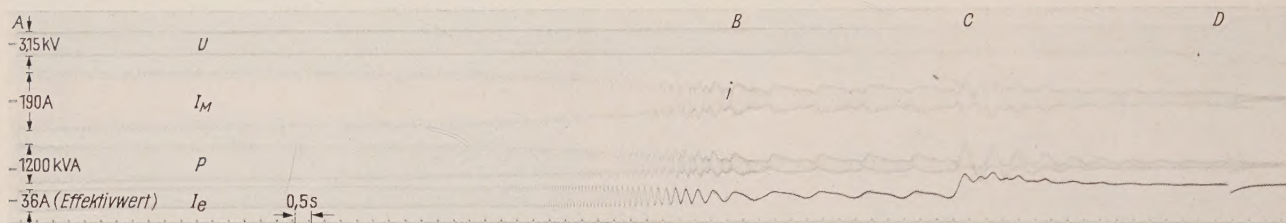


Bild 4 Anlauf und Einsteuervorgang

Kurbelwinkel erreicht, der Kontakt am Winkelmeßgerät bewirkt das Zuschalten der Erregung, der Motor wird synchron. Nach einer kurzen Pause wird schließlich bei *D* auf volle Spannung umgeschaltet.

Wie gezeigt werden konnte, lassen sich bei Synchronantrieben unter geeigneten Voraussetzungen sehr niedrige Anlaufströme erreichen. Für den Ausgleich von Stromschwankungen bei mehreren parallellaufenden Einheiten erweist sich der Synchronmotor gegenüber allen anderen Motorarten als besonders vorteilhaft.

### Dehnungsmeßstreifen-Manometer zur Fernmessung des Druckes in einer Pipeline

VON GUSTAV HOPPMANN

Für den Betrieb und die Sicherheit einer Rohöltransportleitung [1] ist die Überwachung des Druckes von besonderer Bedeutung. Es wurden deshalb in das gesamte Rohrleitungssystem der Nord-West-Oelleitung GmbH eine Anzahl Druckmeßstellen eingebaut. Sie befinden sich in den Pumpstationen, in der Hauptleitung an den Abzweigpunkten und in den Abzweigleitungen bei den Übergabestationen.

Bild 1 zeigt eine Übersicht der Druckmeßstellen.

Die Druckwerte müssen genau und betriebssicher erfaßt werden können. Mit Hilfe einer Fernübertragung muß die Fernsteuerzentrale in der Lage sein, sich stets ein genaues Bild über den Druckverlauf von der Ausgangspumpstation bis zur Übergabestation und in den ruhenden Leitungsabschnitten zu verschaffen.

Neben der kontinuierlichen Meßwertübertragung besteht die Forderung, Grenzwerte (Überdruck) zu erfassen und gesondert zu

signalisieren. Aber auch ein etwa eintretender Druckabfall ist zu erfassen. Darauf soll hier jedoch nicht eingegangen werden.

### Meßschaltung

Bild 2 zeigt die Meßanordnung für eine Druckmeßanlage mit Fernübertragung.

Zur Kompensationsmeßanlage mit Dehnungsmeßstreifen-Manometern gehören:

#### DMS-Manometer

Meßbereich: 0 bis 100  $\text{kp/cm}^2$  für die Hauptleitung  
oder  
0 bis 50  $\text{kp/cm}^2$  für Abzweigleitungen

- 1 Anschlußkasten mit Verbindungskabel
- 1 Kompensationsanzeiger Form 192  $\times$  96
- 1 automatischer Leitungswiderstandsabgleich
- 1 Verstärker mit Stromversorgungsgerät

Der Druck in der Ölleitung wird vom Hohlzylinder des DMS-Manometers aufgenommen, dessen druckproportionale Ausgangsspannung nach dem Kompensationsverfahren [2] durch Verstellen des Meßpotentiometer-Abgriffes der Vergleichsmeßbrücke kontinuierlich selbsttätig nachgebildet wird.

Auf der Welle des Meßpotentiometer-Abgriffes sind eine Skale für die örtliche Anzeige des Druckes in der Meßwarte der Betriebsstation und ein weiterer Potentiometerabgriff eines Folgepotentiometers als Geber für die Fernübertragungseinrichtung untergebracht. Die gleiche Welle betätigt außerdem die Grenzkontaktscheibe für die Maximumüberwachung (Überdruck).

Die am Folgepotentiometer abgegriffene Spannung wird einem Meßverstärker (MV) zugeführt und von dort einem elektronischen Impulsgeber. Dieser verwandelt den vom Meßverstärker kommenden Gleichstrom in eine der Meßgröße proportionale Impuls-



frequenz von 5 bis 15 Imp/s entsprechend 0 bis 100% des Meßbereiches. Die Impulse werden einem Tonfrequenz-Sender zugeführt und von dort zur Zentrale übertragen.

Als Übertragungswege zwischen Sende- und Empfangsort dienen von der Deutschen Bundespost gemietete Stromwege.

Die Meßwert-Empfangseinrichtung führt die ankommenden Impulse über ein polarisiertes Relais und eine Kondensator-Ladeschaltung in einen Gleichstrom zurück. Dieser ist der Meßgröße proportional und gelangt an den Eingang eines Verstärkers, an dessen Ausgang ein Tintenschreiber angeschlossen ist. Jeder Betriebsstation ist ein Schreiber zugeordnet.

Neben der kontinuierlichen Meßwertübertragung wird auch bei Erreichen des Grenzwertes »Überdruck« ein Signal ausgelöst.

Um die Rohrleitung vor unzulässig hohen Drücken zu schützen, sind die Druckmeßanlagen mit Maximum-Grenzkontakten ausgerüstet. Bei Überschreiten des fest eingestellten Grenzwertes wird die Alarmmeldung gesondert über eine Puls-Code-Fernsteuer- und -Signaleinrichtung zur Zentrale gegeben.

Die Warnmeldung erscheint in einem Signaltableau, das dem jeweiligen Stationsfeld zugeordnet ist, und zwar als Blinklicht und akustischer Alarm.

Kommt der Alarmwert von einer Meßstelle in der Hauptleitung, so wird gleichzeitig eine automatische Notabschaltung der Pumpstation eingeleitet. Solange ein Überdruck ansteht, ist es nicht möglich, die Pumpstation wieder einzuschalten.

#### Einbaumaßnahmen an der Meßstelle

Bild 3 zeigt eine Druckmeßstelle mit DMS-Manometer und Anschlußkasten.

Zwischen dem Manometer und dem 1"-Absperrschieber befindet sich ein T-Stück, dessen einer Stutzen mit einer Blindverschraubung versehen ist. Sie dient zur Entlüftung des Drucksystems und als Prüfanschluß für eine Manometerprüfpumpe zur Eichung. Die DMS-Manometer sind horizontal zur Rohrleitung eingebaut, wozu erwähnt sei, daß die Rohrleitungen an den Pump-, Abzweig- und Übergabestationen oberirdisch geführt werden.

Direkte Sonneneinstrahlung auf die Manometer führt zu Wärmespannungen und damit zu vorge-täuschten Druckänderungen. Deshalb wurden die Meßstellen mit Sonnenschutzdächern abgedeckt.

Zum Schutz vor atmosphärischen Überspannungen auf der isoliert gegen Erde verlegten Ölleitung (Blitzeinwirkung), die nachgewiesenermaßen zu einer Zerstörung der Manometer führen können, wurden die Meßstellen mit einem KATHODENFALL-ABLEITER ausgerüstet.

#### Betriebserfahrungen

In der Hauptleitung wurden DMS-Manometer mit einem Meßbereich von 0 bis 100 kp/cm<sup>2</sup> eingebaut, während der Meßbereich der Manometer in den Abzweigleitungen 0 bis 50 kp/cm<sup>2</sup> beträgt.

Die Drücke in der Hauptleitung liegen so hoch, daß eine gute Ausnutzung des Meßbereiches gewährleistet ist.

In den Abzweigleitungen betragen die Betriebsdrücke nur bis 4 kp/cm<sup>2</sup>. DMS-Manometer mit einem so kleinen Bereich waren nach dem seinerzeitigen Stand der Technik nicht verfügbar. Um trotzdem auf den Tintenschreibern in der Zentrale noch gut ablesbare Werte zu erreichen, wurden auf dem Wege der Fernmes-sung nur 0 bis 10 kp/cm<sup>2</sup>, das sind 20% des Nenndruckes der Manometer, übertragen.

Anfänglich wurde die kontinuierliche Meßwertaufzeichnung auf den Tintenschreibern durch »Meßwertsprünge« (Treppen) gestört, die keine echten Druckänderungen sein konnten. Dies hatte zweierlei Ursachen:

1. Die Nahtstelle zwischen der eigentlichen Druckmeßanlage (Primärgerät) und den Geräten der Fernübertragung (Impulsfre-

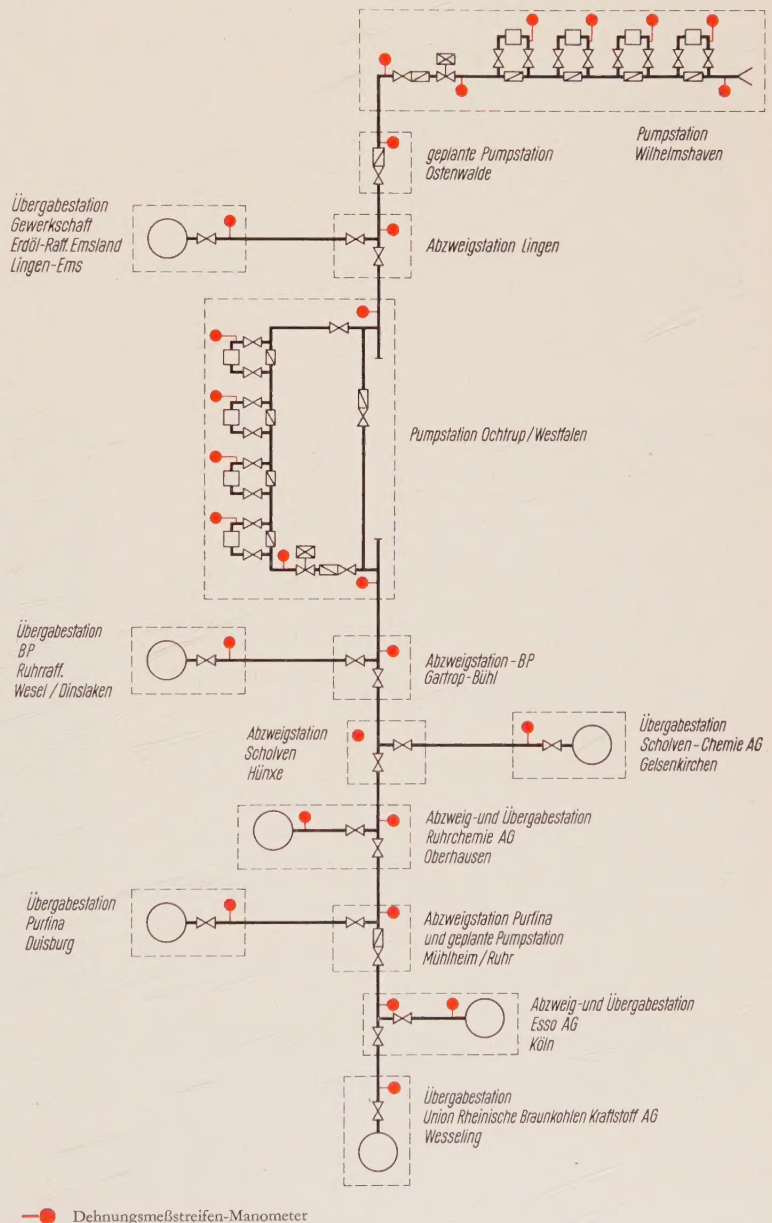


Bild 1 Übersicht über die Rohöl-Transportleitung Wilhelmshaven-Köln der Nord-West Oelleitung GmbH und die Einbauorte der Dehnungsmeßstreifen-Manometer



quenzanlage) bildet das Folgepotentiometer im Kompensationsanzeiger.

Die Impulsfrequenz streute auf elektrostatischem Wege über das Folgepotentiometer auf den Meßkreis ein und ergab damit eine schlechte Einstellsicherheit des Kompensationsanzeigers. Die Folge waren Sprünge im Diagramm, die sich besonders stark bei den in der Abzweigleitung befindlichen Meßstellen bemerkbar machten, weil hier nur 20% des Meßbereiches übertragen werden (Faktor 5!).

Eine einfache Schaltungsänderung in der Impulsfrequenz-Fernmeßanlage beseitigte die Einstreuung und ermöglichte eine saubere Einstellung.

2. Mit der unter 1. erwähnten Schaltungsänderung wurde zwar eine gute Einstellmöglichkeit am Kompensationsanzeiger erreicht, doch waren nach wie vor Meßwertsprünge zu verzeichnen. Die weiteren Untersuchungen ergaben, daß Kontaktstörungen an den Meß- und Folgepotentiometern infolge chemischer Einflüsse Ursache dieser Anzeigefehler waren. Durch besondere Maßnahmen konnten diese beseitigt werden, so daß seitdem eine einwandfreie Übertragung sichergestellt ist.

Die weitere Erfahrung hat gezeigt, daß durch Abkühlung des Meßstoffes (Rohöl) an den Meßstellen in der Abzweigleitung ein Unterdruck entstehen kann. Die Meßbereiche wurden deshalb durch Umbau der Meß- und Folgepotentiometer für einen Bereich von  $-1 \text{ bis } +10 \text{ kp/cm}^2$  ausgelegt, d. h., die Meßbereiche auf 22% des Nenndruckes der Manometer gespreizt. Auch danach war die Einstellsicherheit des Kompensationsanzeigers auf den Stationen noch einwandfrei. Diese Maßnahme brachte aber andererseits eine erhebliche Steigerung der Ablesegenauigkeit der Meßwerte auf den Stationen und eine weiter aufgelöste Übertragung der Anzeige zur Zentrale, da das Folgepotentiometer bei der neuen Bemessung innerhalb des Anzeigebereiches voll ausgenutzt wird.

Grundsätzlich gilt für alle Anlageteile, daß eine einwandfreie Erdung vorhanden sein muß, weil sonst die Gefahr einer unruhigen Anzeige besteht.

Die Druckmeßanlagen sind nunmehr seit mehr als zwei Jahren in Betrieb. Sie erfüllen die geforderte Übertragungsgenauigkeit und Betriebssicherheit. In festgelegten Zeitabständen wird eine Überprüfung mit einem geeichten Prüfmanometer vorgenommen.

#### Schrifttum

- 1) Krüger, H.J. und Gentenbrück, K.: Nord-West Oelleitung Wilhelmshaven-Köln. Eine fernüberwachte und ferngesteuerte Erdöl-Transportleitung. Siemens-Zeitschrift 33 (1959) 365 bis 374
- 2) Horn, K.: Wirkungsweise und Schaltungstechnik elektrischer Dehnungsmeßstreifen-Manometer. Siemens-Zeitschrift 35 (1961) 363 bis 368

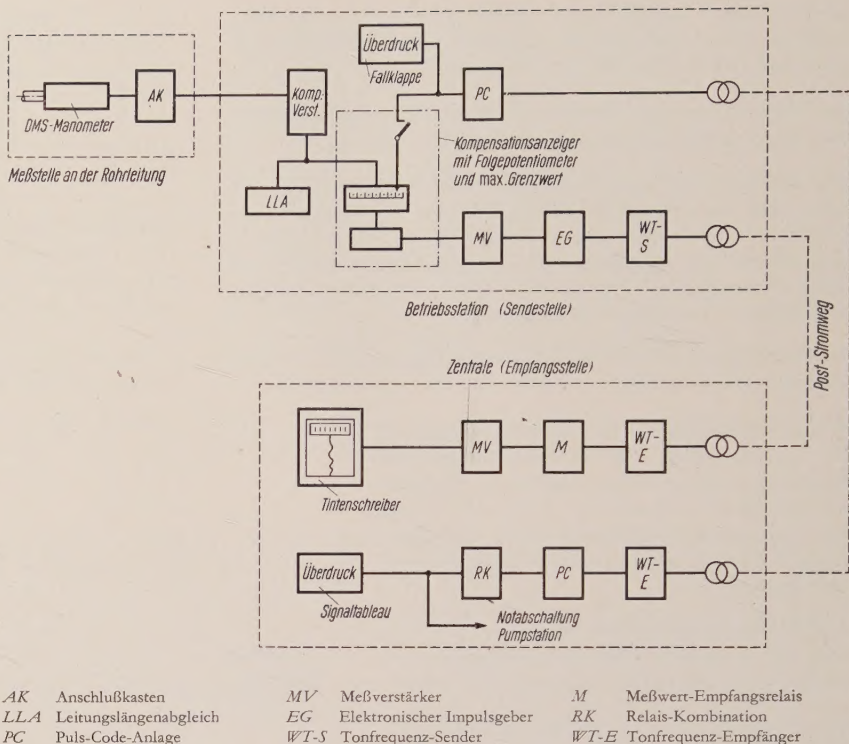


Bild 2 Blockschaltung (für eine Meßstelle) der Druckmeßanlage

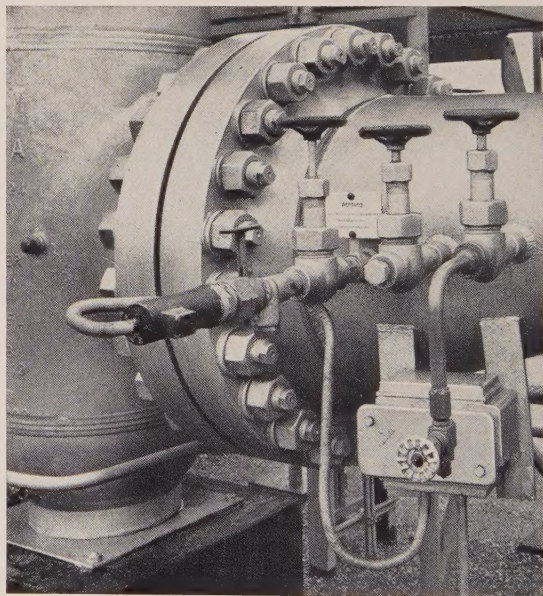


Bild 3 Anbau eines Dehnungsmeßstreifen-Manometers an die Ölleitung; mit Absperrschieber, Entlüftungs-T-Stück und Anschlußkasten